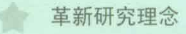
格致方法 · 定量研究系列　吴晓刚　主编

# 基于行动者的模型

[英] 奈杰尔 · 吉尔伯特（Nigel Gilbert）著
盛智明　译

革新研究理念



丰富研究工具

最权威、最前沿的定量研究方法指南

格致出版社　上海人民出版社




# 格致方法・定量研究系列

1. 社会统计的数学基础
2. 理解回归假设
3. 虚拟变量回归
4. 多元回归中的交互作用
5. 回归诊断简介
6. 现代稳健回归方法
7. 固定效应回归模型
8. 用面板数据做因果分析
9. 多层次模型
10. 分位数回归模型
11. 空间回归模型
12. 删截、选择性样本及截断数据的回归模型
13. 应用logistic回归分析（第二版）
14. logit与probit：次序模型和多类别模型
15. 定序因变量的logistic回归模型
16. 对数线性模型
17. 流动表分析
18. 关联模型

题

23. 分析复杂调查数据（第二版）
24. 分析重复调查数据
25. 世代分析（第二版）
26. 纵贯研究（第二版）
27. 多元时间序列模型
28. 潜变量增长曲线模型
29. 缺失数据
30. 社会网络分析（第二版）
31. 广义线性模型导论
32. 基于行动者的模型
33. 基于布尔代数的比较法导论
34. 微分方程：一种建模方法
35. 模糊集合理论在社会科学中的应用
36. 图形代数
37. 项目功能差异

上架建议：社会研究方法

ISBN 978-7-5432-2170-3




定价：15.00元

易文网：www.ewen.c

格致网：www.hibooks.

格致方法·定量研究系列　吴晓刚　主编

# 基于行动者的模型

[英] 奈杰尔·吉尔伯特（Nigel Gilbert）著
盛智明 译

SAGE Publications ,Inc.

格致出版社　上海人民出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

基于行动者的模型/(英)吉尔伯特(Gilbert，N.)著;盛智明译.—上海:格致出版社:上海人民出版社,2012

(格致方法·定量研究系列)

ISBN 978-7-5432-2170-3

Ⅰ.①基… Ⅱ.①吉… ②盛… Ⅲ.①社会科学-统计模型-研究 Ⅳ.①C32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 216226 号

责任编辑 王亚丽

---

格致方法·定量研究系列

**基于行动者的模型**

[英]奈杰尔·吉尔伯特 著

盛智明 译

---

**出 版** 世纪出版集团 www.ewen.cc 格致出版社 www.hibooks.cn 上海人民出版社

(200001 上海福建中路193号24层)

格致出版

编辑部热线 021-63914988

市场部热线 021-63914081

**发 行** 世纪出版集团发行中心

**印 刷** 浙江临安曙光印务有限公司

**开 本** 920×1168毫米 1/32

**印 张** 5.25

**字 数** 102,000

**版 次** 2012年10月第1版

**印 次** 2012年10月第1次印刷

ISBN 978-7-5432-2170-3/C·89

**定 价** 15.00元

# 出版说明

由香港科技大学社会科学部吴晓刚教授主编的“格致方法·定量研究系列”丛书，精选了世界著名的SAGE出版社定量社会科学研究丛书中的35种，翻译成中文，集结成八册，于2011年出版。这八册书分别是：《线性回归分析基础》、《高级回归分析》、《广义线性模型》、《纵贯数据分析》、《因果关系模型》、《社会科学中的数理基础及应用》、《数据分析方法五种》和《列表数据分析》。这套丛书自出版以来，受到广大读者特别是年轻一代社会科学工作者的欢迎，他们针对丛书的内容和翻译都提出了很多中肯的建议。我们对此表示衷心的感谢。

基于读者的热烈反馈，同时也为了向广大读者提供更多的方便和选择，我们将该丛书以单行本的形式再次出版发行。在此过程中，主编和译者对已出版的书做了必要的修订和校正，还新增加了两个品种。此外，曾东林、许多多、范新光、李忠路协助主编参加了校订。今后我们将继续与SAGE出版社合作，陆续推出新的品种。我们希望本丛书单行本的出版能为推动国内社会科学定量研究的教学和研究作出一点贡献。

# 总 序

往事如烟，光阴如梭。转眼间，出国已然十年有余。1996 年赴美留学，最初选择的主攻方向是比较历史社会学，研究的兴趣是中国的制度变迁问题。以我以前在国内所受的学术训练，基本是看不上定量研究的。一方面，我们倾向于研究大问题，不喜欢纠缠于细枝末节。国内一位老师的话给我的印象很深，大致是说：如果你看到一堵墙就要倒了，还用得着纠缠于那堵墙的倾斜角度究竟是几度吗？所以，很多研究都是大而化之，只要说得通即可。另一方面，国内(十年前)的统计教学，总的来说与社会研究中的实际问题是相脱节的。结果是，很多原先对定量研究感兴趣的学生在学完统计之后，依旧无从下手，逐渐失去了对定量研究的兴趣。

我所就读的美国加州大学洛杉矶分校社会学系，在定量研究方面有着系统的博士训练课程。不论研究兴趣是定量还是定性的，所有的研究生第一年的头两个学期必须修两门中级统计课，最后一个学期的系列课程则是简单介绍线性回归以外的其他统计方法，是选修课。希望进一步学习定量研

究方法的可以在第二年修读另外一个三学期的系列课程，其中头两门课叫“调查数据分析”，第三门叫“研究设计”。除此以外，还有如“定类数据分析”、“人口学方法与技术”、“事件史分析”、“多层线性模型”等专门课程供学生选修。该学校的统计系、心理系、教育系、经济系也有一批蜚声国际的学者，提供不同的、更加专业化的课程供学生选修。2001 年完成博士学业之后，我又受安德鲁·梅隆基金会资助，在世界定量社会科学研究的重镇密歇根大学从事两年的博士后研究，其间旁听谢宇教授为博士生讲授的统计课程，并参与该校社会研究院（Institute for Social Research）定量社会研究方法项目的一些讨论会，受益良多。

2003 年，我赴港工作，在香港科技大学社会科学部，教授研究生的两门核心定量方法课程。香港科技大学社会科学部自创建以来，非常重视社会科学研究方法论的训练。我开设的第一门课“社会科学里的统计学”（Statistics for Social Science）为所有研究型硕士生和博士生的必修课，而第二门课“社会科学中的定量分析”为博士生的必修课（事实上，大部分硕士生在修完第一门课后都会继续选修第二门课）。我在讲授这两门课的时候，根据社会科学研究生的数理基础比较薄弱的特点，尽量避免复杂的数学公式推导，而用具体的例子，结合语言和图形，帮助学生理解统计的基本概念和模型。课程的重点放在如何应用定量分析模型研究社会实际问题上，即社会研究者主要为定量统计方法的“消费者”而非“生产者”。作为“消费者”，学完这些课程后，我们一方面能够读懂、欣赏和评价别人在同行评议的刊物上发表的定量研究的文章；另一方面，也能在自己的研究中运用这些成熟的

方法论技术。

上述两门课的内容,尽管在线性回归模型的内容上有少量重复,但各有侧重。"社会科学里的统计学"(Statistics for Social Science)从介绍最基本的社会研究方法论和统计学原理开始,到多元线性回归模型结束,内容涵盖了描述性统计的基本方法、统计推论的原理、假设检验、列联表分析、方差和协方差分析、简单线性回归模型、多元线性回归模型,以及线性回归模型的假设和模型诊断。"社会科学中的定量分析"则介绍在经典线性回归模型的假设不成立的情况下的一些模型和方法,将重点放在因变量为定类数据的分析模型上,包括两分类的 logistic 回归模型、多分类 logistic 回归模型、定序 logistic 回归模型、条件 logistic 回归模型、多维列联表的对数线性和对数乘积模型、有关删节数据的模型、纵贯数据的分析模型,包括追踪研究和事件史的分析方法。这些模型在社会科学研究中有着更加广泛的应用。

修读过这些课程的香港科技大学的研究生,一直鼓励和支持我将两门课的讲稿结集出版,并帮助我将原来的英文课程讲稿译成了中文。但是,由于种种原因,这两本书拖了四年多还没有完成。世界著名的出版社 SAGE 的"定量社会科学研究"丛书闻名遐迩,每本书都写得通俗易懂。中山大学马骏教授向格致出版社何元龙社长推荐了这套书,当格致出版社向我提出从这套丛书中精选一批翻译,以飨中文读者时,我非常支持这个想法,因为这从某种程度上弥补了我的教科书未能出版的遗憾。

翻译是一件吃力不讨好的事。不但要有对中英文两种

语言的精准把握能力，还要有对实质内容有较深的理解能力，而这套丛书涵盖的又恰恰是社会科学中技术性非常强的内容，只有语言能力是远远不能胜任的。在短短的一年时间里，我们组织了来自中国内地及港台地区的二十几位研究生参与了这项工程，他们目前大部分是香港科技大学的硕士和博士研究生，受过严格的社会科学统计方法的训练，也有来自美国等地对定量研究感兴趣的博士研究生。他们是：

香港科技大学社会科学部博士研究生蒋勤、李骏、盛智明、叶华、张卓妮、郑冰岛，硕士研究生贺光烨、李兰、林毓玲、肖东亮、辛济云、於嘉、余珊珊，应用社会经济研究中心研究员李俊秀；香港大学教育学院博士研究生洪岩璧；北京大学社会学系博士研究生李丁、赵亮员；中国人民大学人口学系讲师巫锡炜；中国台湾"中央"研究院社会学所助理研究员林宗弘；南京师范大学心理学系副教授陈陈；美国北卡罗来纳大学教堂山分校社会学系博士候选人姜念涛；美国加州大学洛杉矶分校社会学系博士研究生宋曦。

关于每一位译者的学术背景，书中相关部分都有简单的介绍。尽管每本书因本身内容和译者的行文风格有所差异，校对也未免挂一漏万，术语的标准译法方面还有很大的改进空间，但所有的参与者都做了最大的努力，在繁忙的学习和研究之余，在不到一年的时间内，完成了三十五本书、超过百万字的翻译任务。李骏、叶华、张卓妮、贺光烨、宋曦、於嘉、郑冰岛和林宗弘除了承担自己的翻译任务之外，还在初稿校对方面付出了大量的劳动。香港科技大学霍英东南沙研究院的工作人员曾东林，协助我通读了全稿，在此

我也致以诚挚的谢意。有些作者，如香港科技大学黄善国教授、美国约翰·霍普金斯大学郝令昕教授，也参与了审校工作。

我们希望本丛书的出版，能为建设国内社会科学定量研究的扎实学风作出一点贡献。

吴晓刚

于香港九龙清水湾

# 序

研究社会行为有两种普遍的方法：收集观察的、抽样调查的或其他形式的数据，并通过估计一个模型来分析它们；或者是从关于某种社会行为的理论认识开始，建立一个关于它的模型，然后模拟它的动态过程以获得一个对看似简单的社会系统的复杂性的更好理解。Sage"社会科学中的定量应用"系列丛书中的大部分采用的都是第一种方法。基于行动者的模型，作为极少的例外之一，采用的是第二种方法。

应用于社会科学的许多统计方法都有一个漫长的发展历史。比如，回归方法起始于高尔顿(Galton)在19世纪的开创性工作。基于行动者的模型的起源通常归功于冯·诺伊曼(Von Neumann)，因为他在20世纪40年代晚期发明了以他的名字命名的模型。虽然名为冯·诺伊曼的模型并不是基于行动者的模型甚至也不是任何种类的模型，但是它们作为理论建构为虚拟生活的建构和模型化奠定了基础。在过去的十几年里，基于行动者的模型在经济学、政治学、社会学和其他一些社会科学中已经变得越来越流行。

这一分析方法有何独特之处呢？比如，以托马斯·谢林

(Thomas Schelling)发表在1971年《数学社会学》期刊(*Journal of Mathematical Sociology*)的经典之作为例。他建立了一个非常简单的区隔动态模型,这个模型是通过在棋盘上依照一定的简单规则去移动一分和一角的硬币来实现的。一分和一角的硬币代表了居住在棋盘(城市)方格(房屋或地段)中两个来自不同社会群体的行动者。令人惊奇的发现在于,虽然每个行动者都容忍来自不同群体的邻居(或者适度地偏好自己所属的群体),但总体(在整个棋盘—城市中)最终依然以出现严重的区隔结束。谢林这个简单的基于行动者的模型揭示出了微观层次的个体动机和宏观层次的社会行动之间的一些复杂关系。

奈杰尔·吉尔伯特,作为一名基于行动者模型的国际权威和《虚拟社会和社会模拟》期刊(*Journal of Artificial Societies and Social Simulation*)的编辑,是为这个系列的此主题写书的最合适人选。在本书中,吉尔伯特以通篇的例子来解释基于行动者的模型的基本原理并讨论了基于行动者模型的应用软件。他写得清晰、明确,对研究者掌握一个不熟悉的议题非常重要,而且这些研究者都能熟练地运用回归类型方法。这本书及时地填补了这个系列的重要空白,这个空白是我作为系列丛书的编辑希望填补的,它也有助于传播一种在本质上非常有用的方法,而这种方法是我们作为社会科学家都应该知道的。

廖福挺

# 前言

基于行动者的模型是一种计算机模拟的形式。虽然模拟作为一种研究技术在从天文学到生物化学的自然科学中已经是非常重要的部分，但直到最近为止它在社会科学中仍然是被忽视的。这可能是因为缺少尊重社会科学特殊需求的计算机方法。然而，在20世纪90年代早期，基于行动者的模型的价值开始逐渐被认识，从那以后，运用基于行动者的模型的研究数量开始迅速增长，一些例子也开始在核心期刊上出现(Gilbert & Abbott, 2005)。

当理解一些议题的过程和它们的结果同样重要的时候，基于行动者的模型就特别适合于这些议题。在本质上，人们创建一个计算机程序，然后运行这个程序，观察它在整个模拟期间在进行什么。在被模型化的行动者和程序中的行动者之间存在一个直接的对应，这使得这种方法在直观上颇具吸引力，尤其是对那些玩电脑游戏长大的一代。尽管如此，基于行动者的模型从严谨性角度而言仍然位于数学和统计模型一边。如同基于公式的模型，而不是像散文那样。基于行动者的模型如果能够被电脑执行的话，它们就必须具有完整性、一致性和清

晰性。另一方面,基于行动者的模型和大多数数学模型不同,它能够包含在特征和能力上有异质性的行动者,能够对远离均衡的情况建模,并能够直接处理行动者之间互动的结果。

因为是一种新的方法,所以现在只有很少的课程讲授基于行动者的模型的建模技术,虽然课程数量正在迅速增加,但是只有很少的教材是直接针对有兴趣的社会科学研究者的(Degushi, 2004; Gilbert & Terna, 2000; Gilbert & Troitzsch, 2005; Grimm & Railsback, 2005; Liebrand, Nowak & Hegselman, 1998; Macy & Willer, 2002; Schweitzer, 2003; Tesfatsion & Judd, 2006)。这本书提供了对此模型的介绍,强调了当选择基于行动者的模型作为合适的方法时建模者需要作出的决定,并给出了关于如何进行相关操作的一些技巧。本书的目的是使社会科学家和研究生们能够进行操作实践,而且它已经在计算机社会科学研究生层次的课程或博士生项目中被用做基于行动者建模的推荐读物。它也适合作为关于高级社会研究方法的研究生课程中的辅助性读物。在任何语言下的计算机编程知识和经验都将有助于理解本书,但并不是必要的。

这本书最后以出版的书籍、网络资源和参考文献作为结束。因为这个领域发展得异常迅猛,所以只能提及现有研究中的一些例子,并针对特定议题提供有着更多细节的参考书。如果容量足够,还可以引用更多的内容。另外,本书只简要地提及了两个与基于行动者的模型紧密相关的领域:网络模型和博弈模型,关于二者更加详细的内容都在 Sage 丛书的其他书中有涉及,比如斯科特(Scott)的《社会网络分析》(*Social Network Analysis*)(2000)以及芬克、盖茨和休姆斯的《博弈理论问题》(*Game Theory Topics*)(Fink, Gates & Humes, 1998)。

# 目 录

第1章

# 基于行动者建模的构想

基于行动者的模型虽然对于社会科学而言是一个新的分析方法，但却迅速流行起来。本书解释了基于行动者的模型到底是什么，提醒了在运用此模型时存在的一些危险，并描述了进行基于行动者模型建模的一些典型方法。最后，它提供了一系列来自社会科学的例子。

第 1 章在将基于行动者的模型与其他可能更令人熟悉的模型对比之前，先简要概述了此模型，并描述了目前在基于行动者建模研究中的一些例子。第 2 章将介绍更加细节的部分，思考一系列方法论和理论问题，并解释什么是“行动者”。第 3 章进入到建立基于行动者模型的具体环节当中，回顾可用的软件平台，并逐步展示如何使用其中之一来建立基于行动者的模型。第 4 章提供了关于如何设计基于行动者的模型，如何在社会科学研究中使用它们以及如何发表以基于行动者建模为基础写成的论文的一些切合实际的建议。第 5 章讨论了基于行动者建模研究的未来发展和可能取得的进展会在哪里。最后，本书以相关的网络和出版资源列表作为结束。

基于行动者建模作为社会科学中的一种建模方法已经变得越来越流行，因为它能够建立代表单个实体和它们之间

互动的模型。在与运用结构方程的基于变量的方法，或与运用微分方程的基于系统的方法进行比较时，基于行动者建模为模型化个体的异质性提供了可能，它能明确地表示出行动者的决策规则，并将行动者放置于地理或其他类型的空间中。它允许建模者以一种自然的方式表示出分析的多种尺度，从个人行动到宏观或社会层次结构的出现，以及适应和学习的各种种类，这些都是其他建模方法所不能轻易做到的。

# 第1节 | 基于行动者建模

基于行动者建模是一种计算机方法，它能够使研究者创建、分析和试验由在环境中互动的行动者构成的模型。让我们分析一下在这个定义中的每一个关键词。

## 一种计算机方法

首先，基于行动者的模型是计算机社会科学的一种。也就是说，它涉及建立作为计算机程序的模型。建模的思想在大多数社会科学中都为人所熟知：创建某种“社会现实”的简化代表，以尽可能清晰地展现出人们所相信的现实世界的运行方式。例如，如果有一个因变量和一个或更多的自变量，回归方程就可以作为变量之间关系的模型。由节点和边线组成的网络可以模型化一组朋友关系。甚至对一种关系的普通语言描述，比如一个国家中保护知识产权的力度与创新程度之间的关系，也可以被看做一个模型，虽然这是一个简单和相当非正式化的模型。

计算机模型作为计算机程序被公式化，其中存在一些输入（如自变量）和一些输出（如因变量）。程序本身代表了被认为存在于社会世界中的一些过程（Macy &Willer, 2002）。

例如,我们可能有一种关于朋友影响消费者购物选择的理论。我们可以建立一个程序,在此程序中,个人(行动者)根据他们自己的偏好来购物。而有趣的地方在于,一个行动者所购买的物品将影响其朋友的购物行为,并且这个朋友所购买的物品又会反过来影响到第一个行动者。运用基于行动者建模就相对比较容易模型化这种相互强化的过程。

计算机建模的一个好处是它迫使人们要精确:不像用自然语言表达的理论和模型,如果要使一个计算机程序运行的话,那这个程序就必须是完整的和完全具体化的。另一个优点在于一般而言它相对比较容易能模型化关于过程的理论。如果建构计算机模型的构想使你想起了电脑游戏,特别是玩家自己去构建虚拟世界的那种,例如 Sims(http://thesims.ea.com),这也并不是巧合。这些游戏其实非常接近计算机建模,虽然为了使它们变得有趣,这些游戏通常会比基于行动者的模型具备更新奇的画面和更少的社会理论。

## 试验

在物理学、化学以及部分生物学中,试验是进行科学研究的标准方法,但在社会科学中,进行试验是不可能或不合适的。一个试验包括将一些试验处理应用于一个封闭的系统并观察发生的反应,将被处理过的系统与另一个在其他方面都相同但未受到处理(被控制)的系统做比较。试验的最大优点在于使人们能够确认正是这个试验处理引发了被观察到的效应,因为在被处理系统和被控制系统之间不同的只有这个处理,并且这些系统是与其他可能引发变化的因素隔

离开来的。然而，在社会系统中，隔离通常是不可能的。因此，虽然试验的结果具有潜在的清晰性，但却很少被社会科学家所采用就不奇怪了。

基于行动者建模的一个最大优点是：在确保人类系统的隔离和避免试验的道德困境时可能会遇到的困难在对虚拟或计算机系统进行试验时都将不存在。试验可以通过使用一系列参数或允许一些因素随机变化的方法而被配置和重复很多次。当然，用关于一些社会现象的计算机模型来进行试验时，只有当这个模型以与人类系统一样的方式运作，换句话说，只有当这个模型是一个好模型的时候，才会产生有趣的结果，但人们可能并不知道情况是否如此。所以，基于模型的试验并非是万能的。

在模型中而不是在真实系统中进行试验的想法其实并不新颖。例如，建筑师将一个摩天大楼的模型放在风洞中去测试它在狂风下的运动，他们对模型进行试验的原因与社会科学家想要对他们的模型进行试验的原因是一样的：对真实摩天大楼进行试验的成本太高了。另一个对模型进行试验的理由在于这可能是得到结果的唯一方法。分析性地得出模型的运动通常是最好的方法，因为它在一系列给定的输入值下给出了关于模型将如何运动的信息，但通常分析性的解决方案并不容易获得。在这些情况下，就有必要对不同的输入值进行试验来看模型是如何运动的。模型可能处于许多不同的环境之下，以此来模拟真实世界。

## 模型

计算机社会科学是基于建构模型然后用它们来理解社

会世界这样的思想之上的(Sawyer, 2004)。模型在社会科学中已有很长的历史——比计算机使用的历史还要长很多——但只有在统计方法开始应用于分析经济学和人口学中的大量定量数据时它才崭露头角。模型试图去代表或模拟一些真实存在的现象,这被称为模型原型。模型的两个主要优点在于它简明地展现了原型特征之间的关系,并且它使人们可以通过研究模型发现关于原型的信息(Carley, 1999)。

一个众所周知的最早的社会科学模型是菲利浦斯(Phillips, 1950)的经济学水力模型,在这个模型中,相互联系的管道中流动的水被用来代表货币的流通。这个模型目前仍然能够在伦敦的科学博物馆中被欣赏到(http://en.wikipedia.org/wiki/MONIAC_Computer)。改变参数诸如利息率的影响可以通过改变流经管道的水的流动率来研究。

模型有许多风格,有必要列出其中的一些来说明它们之间的差异。

(1) 比例模型是原型较小的版本。与大小一起减小的是在模型细节和复杂性水平上的系统性减小。例如,一架飞机的比例模型可能与它的原型具有相同的形状,但可能没有展现电子控制系统或可能没有真飞机上的引擎。同样,一个城市的比例模型将比真实的城市小很多而且可能只模型化了两个维度(例如,建筑物之间的距离,但没有建筑物的高度)。当在研究完模型后再对原型下结论时,我们需要记住,从模型中得出的结论需要按比例还原到原型的维度上去,并且有些没有被模型化的特征很可能会影响到结论的有效性。

(2) 理想型模型是原型中的一些特点被夸大以便于简化

的模型。例如,一个股票市场的理想化模型可能假设信息能够及时地从一个交易者流向另一个交易者;交通的理想化模型可能假设司机从来不迷路,等等。理想化具有将一个或更多复杂因素移除出模型的效应,如果这对模型如何运行的影响微乎其微,那么这个模型得出的关于原型的结论仍将是有用的。

(3) 类比模型是以一些已经得到很好理解的现象与原型进行类比为基础的模型。最著名的例子就是原子的撞球模型,但社会科学中也存在这样的例子,例如思维的计算机模型(Boden, 1988)和组织的垃圾箱模型(Cohen, March & Olsen, 1972)。这些模型都是有用的,因为从类比中得到确认的结果能够被延续和应用到原型上,当然这些结果的有效性依赖于类比的恰当性。

以上这些类别都不是互斥的,一个可能的并且的确很普遍的情况是,一个模型可能同时是比例模型和类比模型(例如,上面提到的经济学水力模型就是这样的混合)。

有些模型被归到与前面都有些不同但在社会科学中也会经常遇到的第四类别,这些模型通常被称为数学或基于公式模型。例子就是定量社会学中的结构方程模型和新古典经济学中的宏观经济模型。这些模型具体化了变量之间的关系,但与其他三个类别的模型不同,它们并没有显示模型和原型之间的类比或相似。通常,数学模型的成功是通过数据与公式的拟合程度表现出来的,而公式形式本身却不令人感兴趣或重要性不大。例如,科布-道格拉斯(Cobb-Douglas)的生产函数是一个关于生产产出如何与生产投入相关的数学模型(Cobb & Douglas, 1928):

$$Y = AL^{\alpha}K^{\beta}$$

其中 $Y$ = 产出，$L$ = 劳动力投入，$K$ = 资本投入，$A$、$\alpha$、$\beta$ 是由技术决定的常数项。这个公式的形式来自于统计证据，而不是来自于对关于公司行为的理论化。虽然数学模型在阐明变量间关系的社会科学的某些方面非常成功，但它们在帮助人们理解为什么一个变量会与另一个变量相关这点上通常不是很有用，换句话说，在表达关于过程和机制的构想上不是很有用，而在这点上其他种类的模型通常会更有帮助。

## 行动者

基于行动者的模型由在一个环境中互动的行动者构成。行动者要么是单独的计算机程序，要么是更普遍的用来代表行动者的一个程序的不同部分——单个的人、组织（如公司），或实体（如民族—国家）。它们被编入程序中来对它们所处的计算机环境作出回应，而这个环境是社会行动者在其中行动的真实环境的模型。

正如在后面我们将会看到的，基于行动者的模型的一个关键特征在于行动者能够进行互动。也就是说，他们能相互传递信息性消息，并且能够基于他们从这些消息中学习到的内容展开行动。这些消息可能代表人们之间的口头对话或信息流动的更加非直接的方式，例如对另一个行动者的观察或对另一个行动者行动影响的检测。这种模型化行动者与行动者互动的可能性是将基于行动者的模型与其他种类的计算机模型区分开来的主要方式。

## 环境

环境是行动者在其中行动的虚拟世界。它可能是一个完全中立的媒介，对行动者产生的影响很小或根本没有影响，或者在其他模型中，环境可能如行动者自身一样被小心地制作出来。通常，环境代表地理空间，例如，在关心居住隔离的模型中，环境模拟出一个城市的一些物理特征。在国际关系的模型中，环境绘制出国家和民族(Cederman，1997)的版图。那些环境在其中代表地理空间的模型被称做直观空间。在其他模型中，环境可以是一个空间，但并不表示地理环境而是其他一些特征。例如，科学家可以被模型化进"知识空间"(Gilbert，Pyka & Ahrweiler，2001)。在这些空间模型中，行动者用坐标来表明他们的位置。另一种选择是没有空间表征但是将行动者全部连接进一个网络中，在这个网络中一个行动者与其他行动者之间关系的唯一标识就是用网络连线与之连接起来的行动者列表(Scott，2000)。

为了使这些定义在某种程度上变得更加具体，在下一节中，我们将介绍关于这些概念的基于行动者的模型的一些例子。

# 第2节｜一些例子

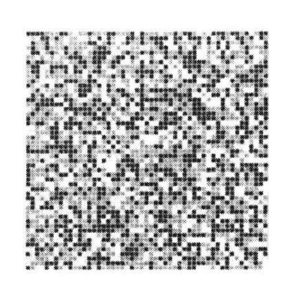
基于行动者的模型在社会科学的大多数分支学科中都具有价值。这一节所简要介绍的模型是选择出来说明它们涉及的问题领域的多样性。在这些领域中它们被卓有成效地加以应用。

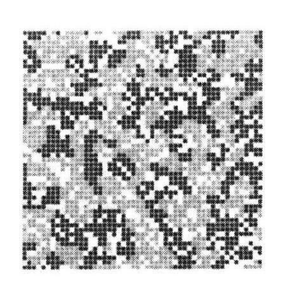
## 城市模型

1971年,托马斯·谢林(1971、1978),也可参见萨科达(Sakoda, 1971),提出了一个模型,用于解释在美国城市中观察到的种族隔离。这个模型作为原创性构想是一个非常抽象的模型,但它在解释美国和其他城市中心的种族隔离持续性的新近研究中已经很有影响力。这个模型基于一个常规的由单元格组成的正方形网格,正方形网格代表一个城市区域,在此区域内的行动者代表家庭户,它们是随机安置的。行动者有两种(我们称之为"红"和"绿")。每个单元格一次只能容纳一户家庭行动者,并且有许多单元格是空的。在每一个时间步骤中,就每户家庭对它直接的邻居(围绕着它的8个单元格)进行调查并算出与它不同颜色家庭的分数。如果这个分数比一些恒定的"容忍"阈值大,即比围绕在一个绿格

周围的已设定的红格比例或在一个红格周围的已设定的绿格比例大，这个家庭就会认为自己“不幸福”并决定搬迁。它就会迁移到网格中一些空白的单元格里。

在下一个时间步骤中，这个新安置的家庭可能会打破它邻居的“容忍”平衡，使它们中的一些变得“不幸福”，这就可能导致一连串的重新安置。当容忍阈值在0.3或以上时，最初随机分布的家庭户就分隔成红色和绿色的小块，每种相同颜色的家庭聚集到一起（图1.1）。即使当家庭可以“容忍”居住在临近的大部分邻居都是不同颜色时，这种聚集也会发生。谢林解释说，这表明了即使种族偏见的程度很低，也有可能产生像20世纪70年代美国城市那样的典型的强隔离模式。





资料来源：Wilensky, U.(1998), NetLogo 隔离模型，http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/segeration. 关联学习和基于计算机模型中心，西北大学，Eranston, IL。

**图1.1 开始时(左)和达到均衡后(右)的谢林模型，0.3的统一容忍度**

谢林模型之所以具有影响力是因为以下几个原因(Allen, 1997)。第一，其结果——相同颜色的家庭聚集——令人惊讶，并且这一结果如果只从个体行动者的运动规律考虑的话是不容易预料到的。第二，模型非常简单，只有一个参

数值，即“容忍”阈值。因此很容易理解。第三，意外的聚集行为是相当稳健的。在许多不同的容忍阈值下，在不同的运动规律下(例如，家庭行动者能够随机选择一个新单元格，或者使用效用函数选择最喜欢的单元格，或者如果单元格标明了价格，则将支付能力也纳入考虑范围，等等)，以及在关于应考虑哪些邻居的不同规则下(例如，在周围8个单元格中；东南西北4个单元格中；或远处更大的两圈或更多的单元格)(Gilbert, 2002)，都能获得相同的结果。第四，这个模型直接给出了如何用经验数据检验它的建议(Benenson, Omer & Hatna, 2002; Bruch & Mare, 2006; Clark, 1991; Pancs & Vriend, 2004; Zhang, 2004)，虽然实践证明非常难取得关于家庭地点偏好的可靠和广泛的数据来计算“不幸福”比率。谢林模型与前面提到的其他基于与迁移流动和居住物业相对价值有关的公式的模型相比，其优点在于需要估计的参数数目更少并且模型易于模拟和分析。现在工作就集中于将此模型变得更加具体，将抽象的正方形网格替换为真实的城市地理，并增加更多的因素，例如家庭对想要迁入地点的支付能力。

## 民意动态

另一组具有重要潜在意义的有趣模型组是关于对政治民意发展的理解。例如，解释在一个群体中极端主义民意的扩散。虽然有许多相关的研究探讨了不同假设的结果和民意传播的机制，但我们在此只回顾一个这样的研究(Deffuant, 2006; Deffuant, Amblard & Weisbuch, 2002; Heg-

selmann & Krause，2002；Lorenz，2006；McKeown & Sheehy，2006；Stauffer，Sousa & Schulze，2004）。Deffuant 等人(2002)问道：

> 最初被认为是极端和边缘的民意如何能成功地变为一个群体中大部分人的准则？人类历史上的一些例子表明，一个大型社区由于在刚开始时受一小撮少数人的影响会或多或少有点突然地在全球范围内形成一种极端民意。20 世纪 30 年代的德国就是关于这个过程的一个特别富有戏剧性的例子。在最近的几十年中，一群最初为少数派的极端伊斯兰分子成功地说服了中东国家的大部分人口。我们可以考虑一些不那么具有戏剧化的过程，比如时尚，这就是少数人群体的行为，一旦其被认为是前卫分子，就会成为大部分人的准则。另一方面，人们也可以找到许多产生了严重的群体两极分化的例子，比如冷战时期的欧洲。在这些例子中，整个人群都变成了极端派（选择一边或另一边）。

在德福安特(Deffuant)等的模型中，行动者持有一种观点（一个在－1.0 和＋1.0 之间的真实数字）以及对他们自己观点的怀疑度，被称之为不确定性（一个正的真值）。行动者的观点分段被界定为行动者观点中心的一段，随着行动者不确定性值的大小向右或向左延伸，行动者随机互动。当他们相遇时，如果他们的观点分段重叠，一个行动者可能就会影响另一个行动者。如果观点分段不重叠，就假设行动者的观点差异较大以至于他们没有机会影响彼此。如果一个行动

者影响了另一个行动者，那么这个行动者（行动者 $j$）的观点受另一个行动者（行动者 $i$）观点影响的大小就是，他们之间观点差异的一定比例数乘以观点重叠数除以行动者 $i$ 的不确定性程度，再减 1。这个公式的效应是，具有非常不确定性的行动者对其他行动者产生的影响要比那些具有确定性的行动者对其他行动者产生的影响小（Deffuant et al.，2002：公式 1 到 6）。

除了一些拥有最积极和最消极观点的极端派，每一个行动者在刚开始时都持有一个来自于统一随机分布的观点，并具有相同层次的不确定性。极端派被给予一个低水平的不确定性，即假设极端派对他们的极端观点相当确定。在这些条件下，极端主义扩散开来，并且最终模拟达到了一个稳定状态，所有行动者都成为了在民意连续体的一端或另一端的极端分子。在不存在具有政治确定性的极端分子的情况下重新进行模拟，取而代之的是群体融合，所有行动者共享一个温和的观点。因此，模型表明一些其观点不能被其他行动者所影响的极端分子能够对大多数人的观点产生戏剧性的影响。这一研究对于理解恐怖主义运动的发展有一定的启示，在这些运动中一些极端分子能够从更广泛群体的相当比例的人口中获得支持。

## 消费者行为

对商业界而言，自然非常想知道究竟什么会影响消费者购买他们的产品。虽然产品内在的质量通常是重要的，但朋友、家庭、广告、时尚和其他一系列“社会”因素的影响也同样

重要。为了考察这些因素之间复杂的互动，一些研究者已经开始运用基于行动者的模型，其中行动者代表消费者。在这些研究中，第一个报告这一模型的是詹森和雅格尔（Janssen & Jager, 1999），他们探讨了导致“锁定”消费者市场中的过程。当在许多竞争性产品中的某一个实现了主导以至于对于个体消费者而言很难转向其他竞争者的产品时，锁定便发生了。经常被引用的例子是 VHS 录像带（超越了 Betamax）、QWERTY 键盘（超越了其他按键布局）、微软操作系统（超越了 Apple 和 Linux），等等。詹森和雅格尔关注于导致锁定的行为过程，因此他们为被他们称为“消费者”的行动者赋予了心理上可能的决策规则，并仔细地依据社会比较和模仿等行为理论对其进行合理化。

另一个模型化消费者的例子是伊斯奎多（Izquierdo, 2006）所做的研究，在这个研究中，作者考虑的市场，如二手车市场，具有质量可变性（不同的产品有不同的质量）和质量不确定性（在购买和使用一个产品之前很难知道它的质量）。此研究探讨了质量可变性是如何损害市场和影响消费者信心的。这里有两个行动者角色：买方和卖方。卖方通过计算他们可以接受的最低价格出卖商品，买方基于商品的期望质量给出一个价格购买商品。期望质量基于经验——要么来自于行动者自己的经验，要么来自于对社会网络中行动者同辈群体经验的积累。系统中的商品数量是有限的，买方和卖方在每一轮买卖中完成一笔交易之后市场都要被清空。社会网络是通过随机连接一对行动者建立起来的，用一个参数来调整连接的数量，从完全连接到完全分开。

作者发现，如果没有社会网络，消费者信心就会降到市

场无法再维持的临界点之下，但如果有社会网络，那么行动者自身经验的积累和其他行动者更多积极集体经验（不是反复无常的）的积累就有助于维持市场的稳定。这表明了社会信息如何能使群体经验积累到一个更准确的水平从而降低单个个体不良经验的重要性。

## 产业网络

大多数经济理论忽略了公司间联系的重要性，但有很多产业区的例子可以说明网络很重要。一个众所周知的例子当属意大利北部的"工业区"，如纺织品生产区普拉托（Prato）。工业区的特点是大量的小公司在一个较小区域内聚集在一起，它们都生产相同种类的产品，相互之间有很强但又有差异的联系。这些联系可能是供应商/消费者的联系，共享技术的合作关系、财务关系，或只是朋友或亲属关系（Albino, Carbonara & Giannoccaro, 2003; Boero, Castellani & Squazzoni, 2004; Borrelli, Ponsiglione, Iandoli & Zollo, 2005; Brenner, 2001; Fioretti, 2001; Squazzoni & Boero, 2002）。另一个例子是"创新网络"，这在知识密集型部门，如生物技术和信息技术部门比较普遍。属于这些经济部门的公司在地理位置上并不总是聚集在一起（虽然在某些区域有集中的趋势），但它们的确与其他类似的公司有很强的网络联系，与这些公司共享知识、技能和技术。

例如，吉尔伯特等提出了一个创新网络模型，其中行动者通过"kenes"来象征他们的知识和专业股份，kenes 被用来发展新产品以在市场上向模型中的其他公司销售。然而，一

个产品只有在它的组件可以从其他公司那里购买到，并且要有某些公司想购买这个产品时，它才能被生产出来。因此，某种程度上，这个模型是一个由相互进行贸易的公司组成的产业市场的模型。另外，公司可以通过内部研发或者通过合作安排从其他公司吸纳获取知识的方式来提高它们的kenes。改进的知识可以用来生产能够卖得更好的产品，或只需要更少或更便宜的组件。某种程度上，这个模型与能够通过一种自然选择(参见第5章第2节)而学习的群体类似。在这个自然选择中，那些不能找到消费者的公司将停止交易，而最优秀的公司将生存下来，与其他公司进行合作，并产生把它们"母"公司最好的方面吸纳进去的子公司。另一个例子参见帕亚雷斯、赫尔南德斯—伊格莱西亚斯和洛佩茨·帕雷德斯(Pajares, Hernández-Iglesias & López-Paredes, 2004)。

## 供给链管理

制造商通常从其他组织那里购买组件并将他们的产品卖给分销商，分销商再卖给零售商，最终，产品到达使用者手中。而使用者可能并不知道协作递送产品的复杂组织间关系。当产品涉及更多组成部分，要在全世界范围内更广泛地进行调拨，以及当管理者试图减小库存、增加货物可得性时，最大化使商家连接起来的供给链的效率变得越来越重要，也越来越困难。模型化供给链是研究订单履行过程和考察管理政策有效性的一个很好的途径。多行动者模型被越来越多地运用于这一目的。

多行动者模型非常适合模拟供给链的任务，因为涉及的商业部门能够被模型化为行动者，每个行动者也都有自己的存货规则。同时也容易模型化产品沿着供给链向下流动和信息从一个组织向另一个组织的流动，比如订货量和领导时间。这就是施崔德、林和肖（Strader，Lin & Shaw，1998）所采用的方法，他们描述了他们为研究在分散的装配供给链中被共享的信息的影响而建立起来的一个模型。分散的装配供给链在电子和电脑产业中较为典型，在这一链条中，有一小部分数量的供应商提供材料和次级组件（如电子仪器），用来组装非商标产品（如硬盘驱动器），然后再用这些产品在销售地组装成定制产品。施崔德等人比较了三种订单执行政策：(1)依据订单制造，生产由客户订单引发；(2)依据订单装配，组件已制造好并存放在库存中，只有最后的装配是由订单引发；(3)依据库存制造，生产是受库存量跌至一定的界限之下所引发。他们也对组织之间共享信息的不同数量进行实验，发现在他们模型化的分散组装供给链中，依据订单装配这一策略，与在供给链的组织之间共享供给和需求信息一起作用是最有效率的。他们还指出，其结果支持这样一种观点，即信息可以代替库存——如果人们掌握准确的信息，就能降低关于需求的不确定性，其结果就是，用于满足订单所需要的库存水平也能相应降低。

## 电力市场

最近几年，许多发达国家的电力供应开始私有化。通常是由两个或三个电力公司先将电力卖给一些销售商，这些销

售商再将电力卖给商业或家庭用户。从一个垄断的、国有或国家控制的供应商到一些供应公司通过竞标进入市场，这样的转变已经启发一系列基于行动者的模型去预测市场调节的影响；供应商和购买者数量和种类的变化；以及预期的政策变化，比如减少电力中断的次数或减小电力生产对环境的影响(Bagnall & Smith, 2005; Batten & Grozev, 2006; Bunn & Oliveira, 2001; Koesrindartoto, Sun & Tesfatsion, 2005; North, 2001)。

在这些模型中，行动者是电力供应公司，他们在一段时间内，如一天或一个小时内，以一个确定的价格向模拟的市场出售一定数量的电力。现实中电力市场也是如此运行的：公司对电力供应报价，最好的报价被接受(不同的市场在关于什么是“最好”的报价上有不同的准则)。通常对电力的需求是连续变化的，所以对电力供应公司而言，设定电力价格以最大化他们的利润是一个困难的工作。一个更加复杂的情况是生产的成本可能是非线性的：匹配顶峰用电需求可能意味着要开动一个只需要使用几小时的电力站。

通过运行模拟，可以研究市场价格降到接近生产边际成本的条件；减少电力供应公司数量的兼并者的影响；以及不同种类的市场“设计”的结果，诸如允许期货交易。目前大多数的模型允许行动者通过使用一种被称之为“强化学习”的技术去“学习”交易策略(参见第 5 章第 2 节)。一个供应商行动者从进行投标开始，投标所用的价格策略就是从对所有供应商而言都通用的一组价格策略中随机选择出来的。如果这个投标被接受而且是有利可图的，这个策略的价值就被增强并且在类似情况下再次使用它的概率就会增加，但是如

果它不成功，再次使用它的机会就会减少（Roth & Erev，1995）。

## 参与和伴随建模

基于行动者的模型已经成功地运用于第三世界国家的农村地区，以帮助其对稀缺自然资源如灌溉用水的管理。这种对基于行动者的模型的神奇运用是因为它们符合“参与式”（或参与性）研究方法。除了应用于研究，多行动者模型还被用于对协商和决策制定的支持以及对培训的支持，例如对塞内加尔的农民（D'Aquino, Le Page, Bousquet & Bath, 2003），法国中央高原护林人和农民（Etienne, 2003; Etienne, LePage & Cohen, 2003）以及南太平洋基里巴斯国（Kiribati）环状珊瑚礁上居民（Dray etc. al, 2006）的培训。

这种也被称为伴随建模的方法（Barreteau, 2003; Barreteau, Bousquet & Attonaty, 2001; Barreteau, Le Page & D'Aquino, 2003）涉及建立一个多行动者系统，这个系统与从在场的人中选出的被调查者有密切联系。作为一个开端，被调查者可能会被问及他们对情况的理解，然后他们会参加一个角色扮演游戏。最终，当获得充足的知识之后，一个计算机模型就被建立起来并与参与者一起用做培训援助或协商支持，回答关于“如果怎样……将会怎样”这种关于可能决定的问题。

例如，为了理解为什么塞内加尔河谷的灌溉计划产生了令人失望的结果，巴瑞特等人（Barrreteau et al.，2001）描述了参与式模型的使用。他们开发了一个角色扮演游戏

(RPG)和一个被称为 SHADOC 多行动者的系统，用以代表卷入将水资源分配到灌溉区域可耕种地区的决策制定过程中不同利益相关者之间的互动。在这个例子中，多行动者模型首先被提出来，然后它的主要元素转变为一个 RPG(其中表演者等于多行动者模型中的行动者)，这一做法的部分原因是为了使基于行动者的模型有效，部分原因是为了 RPG 更容易应用于农村环境中。作者总结这一方法的价值在于“加强了游戏参与者之间的讨论”，以及使“在田野中遇到的问题和每个个体分别知道的问题都转变为常识”。

# 第 3 节 | 基于行动者的模型的特征

这些被选择出来的例子，在表明基于行动者的模型目前的应用范围的同时，也为说明基于行动者的模型的一些特征提供了例证（Fagiolo, Windrum & Moneta, 2006）。

## 本体论对应

模型中的计算机行动者与真实世界中的行动者存在一个直接的对应，这使得设计模型和解释它的结果比诸如基于公式的模型更加容易。例如，一个商业组织的模型能包含雇员、客户、供应商和任何其他的重要行动者。在每种情况下，模型可能包含一个行动者代表整个阶级（如雇员），或者可能是每个雇员分别对应一个行动者，这取决于雇员之间差异的重要性。上面描述的电力市场模型中，市场上的每一个主要成员都有一个行动者与之对应。

## 异质的行动者

一般而言，经济学和组织科学中的理论都作出简化假设，即认为所有行动者在最重要的方面都是相同或相似的。

比如，它们处理的是“典型的公司”或在经济上理性的决策者。行动者可能在偏好上有差异，但是遵循不同行动准则的行动者是不常见的，即使当这种情况被允许时，这种具有各自行为方式的行动者的数量可能也很少。因此，有充足的理由认为，除非行动者是同质的，否则分析性的解决方案是非常难或不可能找到的。计算机模型避免了这一局限：每个行动者都能根据他自己的偏好或者依据他自己的行动准则来行事。在供给链模型中能找到这样一个例子，在这个例子中每个商家都能够拥有它自己控制库存的策略。

## 环境的代表

在基于行动者的模型中，代表行动者直接行动于其中的“环境”是可能的。这可能包括物理的方面（如行动者必须克服的物理障碍和地理障碍），周围位置上其他行动者的影响，以及诸如人群和资源损耗等因素的影响。例如，吉布利特（Gimblett，2002）和他的同事模型化了在加利福尼亚内华达山脉中背包客的运动来检查帮助维持这片荒野保护区的管理政策的效果。被模拟为在这片区域中进行徒步旅行的行动者与模型化区域地形的地理信息系统连接在一起。环境在前面章节中提到的工业区模型中也扮演了重要角色。

## 行动者互动

基于行动者建模的一个重要好处在于它能够模拟行动者之间的互动。简单来说，这些互动包括从一个行动者到另

一个行动者的数据传输，尤其是当另一个行动者就在模拟环境中的附近位置时。如果合适的话，互动也可能会更复杂一些，涉及由某些语言构成的消息的传递，伴之以行动者建构的“表达”和其他行动者对它的解释（但并不一定会获得与述说者所想要表达的相同的意思）。民意动态模型（第 1 章第 2 节）是说明基于行动者的模型中互动重要性的一个很好的例子。

## 受限制的理性

许多模型都隐含地假设它们模型化的个体都是理性的，即它们都是根据一套合理的准则去行动以最大化它们的效用或福利。另一种替代的方法是将行动者模型化为随机或非理性的行动，即以一种并不能最大化他们福祉的方式去行动。两者在一些模型中都有一席之地。一些经济学家，特别是那些使用理性选择理论的经济学家，被人们指责假设的个体“过度理性”，即人们为了选择最优的行动过程而经历复杂推理的长链，甚或人们能够遵循无限扩展的逻辑链。赫伯特·西蒙（Herbert Simon，1957）与其他人都批评这是不现实的，并提出人们应该被模型化为具有有限理性，即他们在认知能力上是受限制的，因此他们最大化其效用的程度也是有限的（Kahneman，2003）。基于行动者的模型使创建有限理性的行动者变得比较容易。然而实际上，挑战通常并不是限制行动者的理性，而是将他们的智力扩展到一定的水平，在这个水平上行动者能够作出老练复杂的决定，就如同人们普遍会作出的决定一样。[1]股票市场模型和第 1 章第 2 节中介绍的

隔离模型都是行动者被设计为只拥有被严格限制的理性。

## 学习

基于行动者的模型能够在个人和群体层次上模拟学习。例如，之前描述的创新网络模型中的公司能够学习如何生产更畅销和更有利可图的产品，并且随着时间的推移整个部门作为一个整体（即在模型中的所有行动者成为一个集合体）也在学习哪些产品可以形成一个具有兼容性的组合，这样的话一个公司的产品就能为另一个公司提供购买的组件。学习可以通过以下三种或其中任一种方法模型化出来：(1)作为个人的学习，行动者从他们自己的经验中学习；(2)作为进化的学习，行动者群体因为某些行动者的“消亡”和被更好的行动者所取替而进行学习，从而导致群体平均水平的提高；(3)社会学习，一些行动者模仿或被其他行动者教育，从而引起在个体层次上积累的但在整个群体中传播的经验得到分享(Gilbert et al.，2006)。上面总结的创新网络模型是一个含有学习模型的范例：作为个体的创新型公司学习如何制造更好的产品，因为业绩欠佳的公司倒闭并被更好的新兴公司取代，所以这个部门作为一个整体能够进行学习以改善它的表现。

某些用于设计包含学习模型的技术将在下文中进行讨论。

# 第 4 节 | 其他相关建模方法

前面一节回顾了一些基于行动者的模型已经发挥作用的领域。然而,基于行动者的模型并不适合于每一个建模任务。在开始新的项目之前,值得关注一下其他的替代性方法。这一节介绍两种应用于社会科学中与基于行动者建模不相上下的建模方式:微观模拟和系统动力学。

## 微观模拟

微观模拟从描述以个人、家庭或组织为样本的大型数据库开始,然后运用一些准则去更新样本成员,好像时间在前进一样。例如,数据库可能来源于一个具有代表性的全国家庭调查,包含了诸如家庭成员年龄、性别、教育水平、收入、职业和养老金安排等变量的数据。这些数据可能与调查进行时的特定时间段相关。微观模拟允许人们去调查样本将来的状况。例如,人们可能想知道在未来五年内样本中有多少人会退休以及这将如何影响收入的分配。如果我们拥有某些关于在一年中个人境况可能发生变化的规律,那么这些规律可以应用于样本中的每一个人以发现在调查结束后的第一年年末可能发生的改变是什么。然后同样的规律也能重

新应用于第二年之后样本出现的状态，诸如此类。当这个老化过程开始进行时，样本整体的合计统计值可以被计算出来（例如收入分布的均值和方差，这可以与调查当时的分布相比较），并能作出关于样本所在的总体中期望变化的推论（Gupta & Kapur，2000；Harding，1996；Mitton，Sutherland & Weeks，2000；Orcutt，Merz & Quinke，1986；Redmond，Sutherland & Wilson，1998）。

微观模拟已经被用来评估在社会安全、个人税收和养老金变化上的分布含义。例如，它有助于估计收入门槛降到国家补助可以支付的水平之下这一变化的影响（Brown & Harding，2002）。试验原型在有数据的情况下也已经被发展出来，它们不仅描述个人也描述公司，并且其中的老化过程不仅受个人特征的影响也受宏观经济变量，如通货膨胀和国内生产总值的影响，相关文献参见 http://www.microsimulation.org/。

微观模拟模型的一个优势在于它不是从一些假设的或随机生成的一组行动者开始，而是从真实的样本开始，像抽样调查描述的那样。因此，与基于行动者的模型相比，从微观模拟的结果中读取信息去预测关于真实总体的未来状态是相对容易的。但是也存在两个主要的不足。其一，老化过程需要非常详细的转变矩阵以明确说明目前在某种状态的行动者在下一年将转变到其他某种状态的可能性。例如，需要知道目前在职的人在一年后变成失业状态的可能性。另外，因为这一转变的可能性在男人和女人之间、在有孩子的女性和没有孩子的女性之间、在年轻人和老年人之间等几乎肯定会不同，所以需要的不是一个单一概率值而是一个条件

概率矩阵，这个条件概率矩阵将对应个人状况的每一种组合。获得这样的转移矩阵的可靠估计可能非常困难，需要从非常大量的数据中得到估计。其二，每个行动者都单独地变老并且被看做好像是与世隔绝。微观模拟没有将行动者之间的任何互动考虑进去，而且通常没有空间或地理的概念。举例来讲，有发现认为，如果一个人所居住地区的失业率很高，那么这个人失业后找到工作的机会就会更低，但微观模拟很难将这种发现考虑进去。

## 系统动态

在用系统动态方法去模型化时，人们创建了一个模型来表达变量间暂时的原因—结果关系，但行动者并不被直接呈现出来。最早和最知名的例子是福雷斯特(Forrester)的世界模型，这个模型被用来预测未来的人口水平、增加的污染和对自然资源的消费率(Forrester, 1971)。系统动态学，正如其名称所体现的，能够模型化交互的变量系统以及能够直接处理因果联系，诸如人口的增加导致资源消耗的增长和反馈回路，就像人口增长依赖粮食供给但粮食供给又依赖人口水平一样(Sterman, 2000)。

通常用图来呈现系统动力模型比较方便，其中箭头表示变量间的因果联系。图 1.2 给出了一个虽然简单、但非常典型的生态系统模型，其中，羊的繁殖与它们的总数成比例，狼吃羊，但如果羊太少的话，狼就会挨饿。矩形框代表羊和狼的存量，像水龙头一样的符号是存量的流入和流出，菱形方块是控制流动率的变量。羊的总数随着羊的出生而增加。

而这发生的比率是由恒定不变的羊出生率所决定的。这个图表明羊以一定的比率死亡，这个比率是活着的羊数量（从羊圈符号到标签为“羊—死亡”的流动控制符号的弯曲箭头）、狼捕获羊的概率（从“捕食率”变量中出来的箭头）和狼的数量（从“狼群”中出来的箭头）的函数。虽然这个演示模型关注的是一些假想的狼和羊，但相似的模型也能为有社会学趣味的议题建构出来，诸如违禁药物使用者和缉毒人员的数量，以及公共健康流行病等（Homer & Hirsch，2006；Jacobsen，Bronson & Operation Research Society of America，1985）。

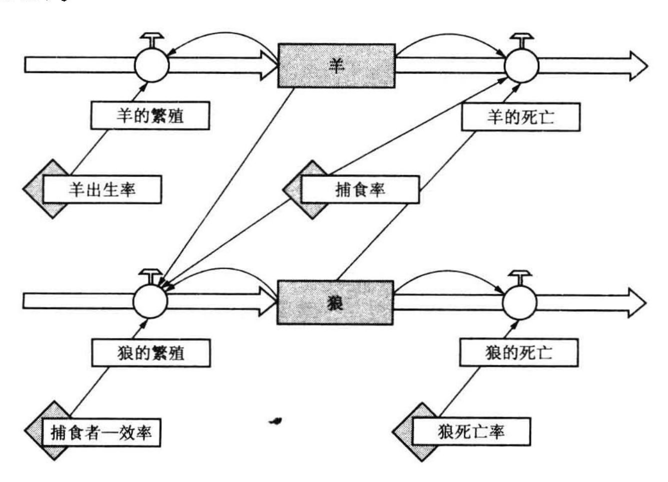



**图 1.2 生态系统模型**

系统动力学是基于对联立的微分或差分方程的评估。每个方程在给定其他变量的数值以及目前时间段因果变量的条件下计算一个变量在下一个时间阶段的值。像 Stella（http://www.iseesystems.com）和 NetLogo（http://ccl.northwestern.edu/netlogo/，在第 3 章中将介绍更具体的内

容)这样的软件能够帮助绘制图表并且也能够通过运算这些方程来执行模拟。

与基于行动者的模型相比,系统动力学方法处理的是一种集合的而非个体的行动者。例如,在狼和羊模型中,模拟程序将计算出在每一个时间段羊的总数,但每个个体的羊并不会被呈现出来。这使它很难模型化行动者之间的异质性;虽然在原则上,每一个不同种类的行动者都可以有一个独特的种群(例如白羊的种群、黑羊的种群、杂色羊的种群等),但是在实际情况中如果多于一些不同类型时这个模型就会变得极其麻烦。在一个系统动态学模型中也很难呈现出行动者基于过去经验、记忆或学习的行动。另一方面,因为它们处理的是集合体,因此系统动态学方法适用于有关行为相似的行动者群体的议题。因此,系统动力学对于福雷斯特的全球经济模型而言是一个合适的方法,因为在这个模型中个体的行为是不重要的,焦点在于作为整体的世界状态。



# 第2章

# 行动者、环境和时间尺度

在前一章中我们注意到基于行动者的模型是由一组在环境中行动的行动者构成。在这一章中，我们将开始展示基于行动者的模型被创建和编程的原则。

# 第1节｜行动者

行动者通常被习惯性地描述为具有四个重要特征（Wooldridge & Jennings，1995）。

(1) 独立自主。不存在一个全局性的控制者命令行动者去做什么；它可以在它目前的状态下做任何被程序设定的事情。

(2) 社会能力。它能够与其他行动者互动。

(3) 反应性。它能够对来自它所处环境的刺激作出适当的反应。

(4) 主动性。它有自己会主动追求的一个或多个目标。

然而，这些特征在设计一个行动者时并不是非常有帮助，而且它需要很多想象力去看在大部分模型中拥有全部这些特征的行动者。描述行动者的一个更有效的方法是说它们具有如下的特征。

(1) 感知。它们能感知它们的环境，这环境可能包括附近其他行动者的存在。在编程的术语中，这意味着行动者有决定位于它们周围的对象和行动者是什么的方法。

(2) 表现。它们有一套能够进行表现的行为。通常，这些行动包括如下的内容：

a. 移动。它们能在一定空间（环境）里移动；

b. 交流。它们能够发送消息给其他行动者并能从其他行动者那里接收消息;

c. 行动。它们能与环境互动,例如,拿起"食物"。

(3) 记忆。它们具有记忆,能够记录它们对于以前状态和行动的感知。

(4) 政策。它们有一套准则,探试法或策略,在给定它们的目前状态和它们的历史的条件下,这些决定了它们现在将要进行的行动。

这些特征能以许多不同的方式被实现。在这一节中,我们描述三个常用的方法:直接用一种编程语言来建构一个模拟和它的行动者、运用一套生产准则系统、运用神经网络。

## 特定的编程

几乎所有的基于行动者的模型都是使用一种面向对象的编程语言建立起来的,如 Java, C++,甚或 Visual Basic。这本书不能教授你面向对象的编程(有许多不错的介绍,包括 Eckel, 2005; Niemeyer & Kundsen, 2005),但是由于面向对象的编程构想对于基于行动者的模型而言非常重要,因此这里对它的主要特征做一个简短的介绍。

面向对象的编程将程序发展为对象的集合,每个对象都有它自己能做的一套事情。对象能够在它自己的属性里面存储数据,能够传送消息给其他行动者,并且有决定如何处理数据的方法。对象导向的一般编程方法的优点在于它提供了一个高水平的模块性:例如,有关对象的方法是如何运作的细节能够在不干扰其他程序的情况下被改变。对于基

于行动者的模型而言，另一个优点在于行动者和对象概念之间有亲和力：很自然地将每个行动者编程为一个对象。

在面向对象的编程中存在一些基本的概念。

(1) 类别是对象的一个抽象说明，包括对象的属性和它的方法。例如，程序中可能包含了一个被称为“公司”的类别，用以代表在一个经济体模型中的一家公司。这个公司可能具有诸如资本化，员工数量和销售产品种类等属性。它也可能具有一些方法用以描述卖出公司产品给消费者和从供应商处购买公司原材料的过程，供应商可能是模型中的其他公司。类别可能被专门化以形成更多具体的类别。例如，一般的公司类别能被专门化为制造公司和销售公司。每个专门化类别继承了比它抽象的类别的属性和方法，而且可能增加了新的属性和方法或覆盖了它继承的属性和方法。比如，制造类别可能需要能决定产品数量的方法，产品数量能从原料的单位数量中计算出来；但销售类别可能就不需要这种方法了。

(2) 当程序运行时，类别被具体化以形成对象。例如，生产类别可能被具体化，产生两个对象，一个表示为 XYZ 公司，另一个表示为 ABC 公司。虽然这两个对象有相同的方法和相同的属性，但他们的属性值(如，他们的资本化、规模、产品类型)可能是不同的。一个对象的方法可能向另一个对象传送消息，因此影响到它的状态。例如，XYZ 对象的一种方法可能向 ABC 传送一个消息要求它卖出一些产品，ABC 的一种方法可能以它希望卖出产品的数量和价格作为回应。

正如这个简要的总结应该表明的，从对象导向到基于行动者建模只是一小步。人们为每一类型的行动者建立一个

类别，提供保存行动者目前状态（记忆）的属性，并加入合适的方法来观测行动者的环境（感知）和依据某些准则（政策）来执行行动者的行动（表现）。另外，人们需要编出一个调度程序用以在模拟开始时具体化所需要的行动者数目，并给每个行动者一个行动的开始。第 3 章包含了一个建立这一模拟的例子。

## 生产准则系统

我们在前面一节已经注意到，在大多数模型中行动者都需要具备能力去感知它们的环境状态、从其他行动者处接受消息、依据它们目前的状态积极地选择行动去表现、并向其他行动者发出消息。实现这些的一种方法是赋予行动者以下的内容。

（1）一组行为准则。这些准则决定行动者将要做什么。依据行动者目前的状态，一个或更多的准则将从这组准则中被选择出来。这些准则通常被称为“条件—行动”准则，因为它们同时包含了条件要素（如果准则要被使用，什么必须是真实的）和行动要素（为执行准则将要做什么）。比如，一个此类的准则可能是“如果我能在附近找到食物，那么我将向它移动一步”。

（2）一个工作记忆。这将由储存了行动者目前状态的变量组成。例如，工作记忆可能储存了行动者目前的方位和它目前的能量储备。

（3）一个准则翻译程序。这是一些程序编码，它们使用工作记忆以便选择哪个准则应该被激活或被“解职”。它可

能需要处理由多于一条准则构成的条件要素被满足的情况，因此需要一些在准则间进行选择的方法。

(4) 一个输入过程。这将从环境中收集消息和感知，并将它们存储在工作记忆中以通过准则处理它们。

(5) 一个输出过程。这将传递消息到环境中，在途中传递到作为预期接收者的行动者那里。

这种安排被称为生产系统，准则为生产准则(Nilsson, 1998; Waterman & Hayes-Roth, 1978)。在生产系统的要素与以上列明的行动者值得拥有的特征之间的对应应该是很清楚的。一个相对简单的生产系统能从诸如 JESS(the Java Expert System Shell, http://www.jessrules.com/)这样的工具包中被建立起来(Friedman-Hill, 2003)。作为替代性选择，也有一些更加精致的系统，这些系统是基于心理学上可能的人类认知模型，比如 Soar(Laird, Newell & Rosenbloom, 1987; Wray & Jones, 2006; Ye & Carley, 1995), CLARION(Sun, 2006)和 ACT-R(Taatgen, Lebiere & Anderson, 2006)。

## 神经网络

另一种提供行动者必备特征的方法是使用模拟神经网络(ANNs)。它们的设计基于生物神经细胞，例如那些在大脑中负责学习或模式配对的神经细胞。ANNs 能够用硬件建立起来，但在一般情况下它们是软件程序或文件库。一个 ANN 由排列在堆积层次上的一些(一般在 10 到 100 之间)单元所组成(Engelbrecht, 2002; Garson, 1998)。每个单元与

层级中在它之前和之后的所有单元相连(图 2.1)。每一个连接都从一层中的一个单元向下一层中的一个单元传递信号(在软件执行中,有一个数字代表信号的大小)。每个单元都将来自前一层的所有信号接收下来,并将每个信号都乘以一个连接权重,将乘积加总,对总和应用一些非线性数学转换(如 logistic 或双曲正切),然后再将信号传送给下一层级的所有单元。第一层的单元从网络之外接受输入,每个单元接受一个,最后一层则发送一个由这一层每个单元发出的信号组成的输出结果。

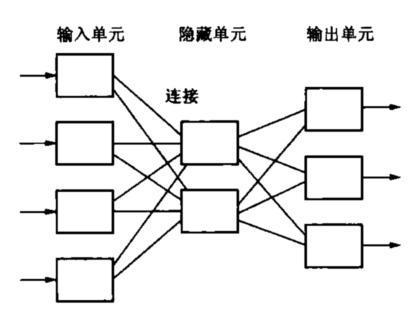



**图 2.1 虚拟神经网络单元示意图**

在 ANN 最简单的应用中,网络被用来识别各种模式,每当一个特定模式被应用于输入时,就输出一个特定结果。例如,一个 ANN 可能被训练去识别条形码,并输出与条形码线的每个模式相对应的数字。在训练之前,所有的连接权重都被设定为随机数值。将一个条形码作为输入应用到第一层只导致在输出层上一个随机信号模式。一种被称为反向传播算法的方法接着被使用。这种方法将实际输出与期望输出相比较(比如,它将未受训练的网络产生的随机数字与条形码被期望产生的数字串相比较),并调整连接权重以使输

出结果更靠近期望输出结果一点儿。然后，另一个输入（如，另一个条形码）被应用，将实际输出与期望输出进行比较，连接权重被再次调整，这个训练过程一直继续到 ANN 在它的认知任务上表现得足够好。这涉及成千上万的训练例子，而一旦网络经历了合适的训练，它就能对它以前从未见过的输入进行解码，或被应用于模型化社会群体理论或金融市场理论（如 Beltratti, Margarita & Terna, 1996; Kitts, Macy & Flache, 1999）。

另一种选择已经在基于行动者的模型中被使用（Acerbi & Parisi, 2006; Cecconi & Parisi, 1998），那就是创建一大群 ANN（每一个 ANN 对应一个行动者）。这些行动者都被一组随机的连接权重初始化，并被设置一个诸如从一片区域中收集“食物”的任务。行动者对它前面是否有食物的感知被反馈到 ANN 的输入中，输出与行动者的行动诸如移动和摄取食物相接。行动者被赋予一个初始的能量值，在每个时间段上都会有其中的一些能量被消耗掉。如果能量降为 0，行动者就会“死亡”，并从模拟中被移除出去。然而，行动者可以通过摄取食物来增强能量，食物散布在地理区域当中。因为行动者的 ANN 被初始化时所用的随机连接权重，大多数行动者在寻找和摄取食物时都将失败并会很快死亡，即使有一些会成功。这些更成功的行动者进行再生产，将与它们自己相似的连接权重给予它们的后代，但会有轻微的变异。逐渐地，行动者群体将学会获取食物的行为。虽然一些差异仍将存在，但每个行动者的能力将一代一代地提高。因此，不像反向传播方法那样直接地改变连接权重，这些模型运用了一种达尔文选择的形式，以更具适应性的权重来产生行

动者。

与运用生产准则对行动者进行编程相比，神经网络的优点在于它们更具灵活性并且能够发展出研究者没有考虑到的行为。神经网络也被认为比生产准则系统更接近于人类大脑（但必须承认虚拟的神经网络与大脑中的生物神经网络的运作方式非常不同，同时也更加简单）。另一方面，一旦神经网络被训练，就几乎不可能去发现它为什么会运作：人们所全部掌握的就只是一个连接权重的矩阵，这个矩阵不能用单元的活动提供关于其行为的全面解释。但使用生产系统，人们可以利用准则去解释行动者的行为。此外，使用通过一个进化过程来训练的神经网络模型是非常占用运算资源的。为了进化一个运行着的行动者，人们需要一个庞大的初始群体和长时间的发展。

# 第 2 节 | 环境

前面一节已经描述了构建行动者的三种方法。行动者在一个环境中行动，环境提供了行动者之间沟通的渠道，同时也可能包含无反应的对象，比如障碍物或能量源。

通过环境来为行动者之间的全部交流安排路径是方便的，这不仅是因为完成它是一个“自然”的方式，对应于环境在人类事物中的角色，同时也因为它使监督行动者变得更加容易。它也意味着从一个行动者传递到另一个行动者的消息能够被暂时地储存在环境之中（缓存的），减小了模拟结果依赖于行动者编码被执行的命令偶然性的可能性。当进行缓冲时，来自行动者的消息被储存在一个临时变量中，直到模拟中的所有行动者都有轮到它们的机会。然后，这些存储的信息被传递给接收者。

在许多模型中，环境会包含被动的对象，比如区域的栅栏，行动者可能经过的“路”和连接，为行动者提供能量或食物的资源，等等。这些都可以用与行动者类似的方法来编程，甚至可以更简单，因为它们不需要具有任何能力来对它们周围的环境作出反应。

因为环境对编程而言经常是一目了然的，所以它很容易被忽略；然而在真实世界中环境的影响通常是非常重要的。

人类生活的许多复杂性都来源于要处理复杂的环境。我们经常把环境当做一个记忆体（比如，将物体放在特殊位置上以提醒我们需要采取的行动），当做价值的储存器（比如，货币和其他形式的财富），以及当做一种使某些行为更加简单的技术性帮助（比如，提供通讯和交通服务的设备）。然而，研究者在设计模拟模型时很少能认识到这种环境复杂性。

# 第3节 | 随机性

在进行模型设计时，从真实世界的复杂性中进行抽象的一种方法是键入一些随机性。例如，在一个产业网络模型中（第1章第2节），有人可能想从一个特定工业部门中发现的公司和公司内部联系中进行抽象以便提出一个关于公司间网络的一般模型。然而，问题是哪些联系应该被建构进模型中。一种答案是随机选择几对公司并在这几对公司之间创建连接。这可以通过许多种方法来完成，主要取决于联系的预期分布。例如，一个公司被连接到另一个公司的机会对于所有公司而言是相同的（随机网络），这种机会可能与已经被连接到其他公司的公司数量有关（偏好连接）（Barabási, 2003; Barabási & Albert, 1999），或者这种机会可能已经被安排好，所以这些连接形成一个由紧密联系的公司组成的当地群落，在群落之间有一些远距离的联系（"小世界"网络）（Watts, 1999; Watts & Strogatz, 1998）。这些替代性方案为网络提供了不同的结构特征，这些结构特征可能会导致相当不同的行为（Pujol, Flache, Delgado & Sangüesa, 2005）。

随机性可能也被用于模型化沟通错误和"噪音"的影响。例如，阿克塞尔罗德（Axelrod）（1997b; Axelrod & Dawkins, 1990）提出了一个具有影响力的关于文化传播（Axelrod,

1997c)的模型以解释如果进行互动的人们的信仰和态度倾向于变得越来越像，为什么差异最终仍然不会全部消失。他的模型展现了具有同质性文化特征的稳定区域的出现，这些同质性文化特征有方言、民族主义信仰、宗教风俗等。在他的模型中，行动者拥有"标签"，一组包含五个数字，用以描述它们在五个文化特征或维度上的文化特点。[2]两个行动者进行互动的机会取决于它们标签的相似性。如果它们进行互动，五个特征中的一个特征就会被随机选出，一个行动者接受与其互动的另一个行动者在这个特征上的值。经过几千次互动之后，独特的区域出现了，在此区域中所有的行动者共享相同的特点，并且与其他区域中的行动者没有共同的特点。阿克塞尔罗德评论说他的模型显示了局部的收敛如何能够引发全球的极化。然而，稍后的研究(Klemm, Eguíluz, Toral & San Miguel, 2003)显示了这种行为严重依赖于行动者精确地复制其他行动者文化特点的值，并且在行动者的特点中也不存在"文化漂移"。相反，如果行动者接受了其他行动者特点的略微变形的复制，或者行动者的信念偶尔发生了随机变化，那么一种单一文化就可能出现，而不是出现许多独特的区域，每个区域有不同的文化。这就是一个关于随机变化或"噪音"如何能够使一个模型的结果产生根本性差异的例子。

# 第 4 节 | 时间

在大多数情况下，模拟过程好像是由一个时钟精心安排进行的，一下又一下。每一下，所有行动者都被给予一个转变。因此，时间被模型化在离散的时间阶段中。每一个时间段都持续相同的模拟期。模拟从零时间点开始，持续足够长的时间，直到所有的行动者都“死亡”或停止行动为止。

当使用离散的时间段来设计基于行动者的模型时，需要考虑三个关于时间的问题。

(1) 共时性。在前一节中我们已经提到需要注意消息从一个行动者发送到另一个行动者的时间。比如，如果行动者 A 发送一个消息给行动者 B，B 回复，然后 C 再发送一个消息给 B，这个结果可能与 A 发送消息给 B，接着 C 发送一个消息给 B，然后 B 再发送一个消息给 A(例如以“内部者交易”模型为背景来思考这些顺序)的结果截然不同。这是关于行动者调用次序这种更普遍性问题的例子(Huberman & Glance，1993)。如果使用一台普通的电脑，因为一次只能做一件事情，因此，实际上行动者不能同时参与行动。可能处理这一情况的三种方法如下：

a. 以相继顺序调用每个行动者(行动者 1，行动者 2，行动者 3，行动者 4，行动者 1，行动者 2，行动者 3，行动者

4，……)(有序不同步执行)。这通常不是一个好的解决方案，因为模型的表现可能极大地受到所使用次序的影响。

b. 在每个时间段上都以一个不同的随机顺序调用每个行动者(随机不同步执行)。这种方法的优点在于可以通过多次运行模拟，每次以一个不同的次序，来考察次序的影响。

c. 以任何方便的顺序调用每个行动者，但用行动者所在的环境来缓冲所有的互动，因此在所有结果输出之前对行动者的所有输入都已完成(模拟的同步执行)。如果这种方法能够实现的话，它就是最佳选择，虽然其安排比较复杂，并且有时候模型的要求也会妨碍它的使用。

(2) 事件驱动的模拟。这三种安排行动者调用顺序的方法假设所有行动者在每个时间段里都需要有一次行动的机会，尽管实际上一些行动者在他们的时间档期内可能什么也没有做。另一种不同的方法是：使用一种事件驱动的设计，在这个设计中只有那些需要行动的行动者才被调用。事件驱动模拟的构想在于不认为有一个恒定不变持续期的时间段，模拟是从一个事件跳跃到另一个事件。模拟的“时钟”一直在被上发条直到下一个事件发生的时间到了。例如，假设我们正在设计一个关于组织决策制定的模拟并且有一个模型，其中的行动者是决策制定委员会。模型的焦点为每个委员会作出的决定以及这些决定如何从一个委员会传递到另一个委员会。在委员会会议之间发生了什么是不用考虑的，而且会议本身被认为是瞬间发生的。在这个模型里，具有一个规则的时间步骤是无效的，因为在大多数的时间段里没有有趣的事情发生。相反，应该设计一个程序便于从一个委员会会议时间“跳跃”到下一个会议时间。

(3) 校准时间。在规则的和事件驱动的模拟模式中，经常有将模拟时间与真实时间匹配的问题。例如，如果有一个消费者行为模型，在这个模型中某人想要研究消费者对一个新产品介绍的反应。比较有趣的事情在于大部分消费者接受这个新产品所要花费的时间。这个模型可能会显示这需要花费多少时间段，但是人们如何能将这转换成真实时间中的星期和月份？一个解决办法就是在现实中观察这个过程，并将新产品接受趋势的形状与模拟的结果相匹配，但这只是给出了大致的解决办法。另外，在这个例子以及其他例子中，关于将什么当做模拟和真实世界中的起始时间或零时间点仍然是一个难题。虽然模拟是在一个界定清晰的时刻开始的，但是在真实世界中，很少有什么活动(例如，一个新产品上市)是在一个清晰的时刻准时开始的。这些问题都需要注意，不存在一个永远适用的一般性解决方案。

第3章

# 在社会科学研究中使用基于行动者的模型

在过去的十几年里，基于行动者的模型已经发展出或多或少标准化的研究程序，包括一系列的步骤。像大多数社会科学研究方法一样，这是实际执行程序的理想状态，事实上，许多步骤都是并行发生的，并且整个程序在构想被提炼和发展时被重复地执行。尽管如此，将这些步骤弄清楚以作为进行基于行动者建模研究的一个指南是有帮助的。

在研究的早期阶段，将宽泛的研究议题缩小范围到具体的研究问题是有必要的。研究问题是一个在研究工作里面有一个能回答它的实际机会的问题。如果一个研究问题太模糊或太宽泛，是没有多大作用的，而且研究也会令人失望，因为它不能提供期望的答案。如果错误出在明确性方面通常会更好一些：是太集中而不是太模糊。有时候将界定研究问题想象成剥洋葱皮也会有些帮助，从调查研究的宽泛领域开始，通过特定议题，到一个研究问题，对于这个问题仅仅只需对你所发现的做一个简要陈述就能回答。

正如我们在之前已经注意到的那样，基于行动者的模型习惯去研究的，是那些在社会或宏观层次上的规律性已经被观察到，但关键是这些规律性如何被解释的问题。经济学家经常称这些规律性为程式化事实（Kaldor，1961）。例如，在

第 1 章中描述的谢林模型从观察到邻居的种族隔离开始并寻求通过模型化单个家庭户的决策来解释它。同样，在第 1 章中描述的电力市场模型也力图通过供应商的动机来解释(和预测)电力供应模式和市场价格。

在明确了研究问题并确认了有待解释的宏观层次的规律性之后，下一步就是要明确模型中将要涉及的行动者。它们可能全部都是一种类型，也有可能是不同的类型。例如，虽然在第 1 章中回顾的民意动力学模型只涉及一种类型的行动者，但那些意见发生改变的行动者也被模拟出来了，第 1 章中提及的某些工业区域模型涉及一些独特类型的公司。对每一类型的行动者而言，需要将行动者的行为放在不同的环境之中，这些环境通常是作为一组条件—行动准则(参见第 2 章第 1 节)。在两个列表形式中来完成这一步是有帮助的：一个列表展现了环境(包括其他行动者)影响行动者的所有不同的方式，一个列表展现了行动者能够影响环境(再次包含了其他行动者)的所有方式。然后，人们可以写下当行动者必须对环境变化作出回应时的条件，以及当行动者需要对环境作出行动时的条件。然后这些列表可以被提炼用以创建行动者准则来显示行动者如何对环境刺激作出作用和反作用。

在这个阶段，人们将会对模型中需要的行动者类型和它们的行为有一个很好的构想。我们有必要去考虑环境应该采取的形式是什么(例如，是否需要是空间的，在其中行动者有一个确定的位置，或者行动者是否应该被连接进一个网络)，以及考虑为了表明模型正在生产所期望的宏观层次的规律性，模型需要展现的特征有什么。一旦所有这些都被考

虑过，就可以开始设计和发展形成模拟的程序代码。

在模型已经被建构起来以后，人们就开始了检查它是否正确的漫长过程。这种检查非正式地被称为除错，正式地被称为检验。检验的任务是确保模型满足它意图实现的具体规划。它与有效性验证相当不同，有效性验证是检查模型对于被模拟现象而言是一个好的模型。一个模拟能够满足检验的标准，是因为它可以按照被期望的方式运行，但是如果模型的具体规划是对社会世界中原型的一个拙劣描述，那它就不是一个有效的模型。

在成功的检验之后，就可以着手进行有效性验证。有效性验证的首要标准是检验模型是否展现了研究试图要去解释的宏观层次的规律性。如果它做到了，就可以证明将行动者的互动和行为纳入编程解释了规律性为什么会出现。然而，必须提防替代性的解释，因为可能存在其他同样的或看似更合理的行动者行为，它也会导致相同的宏观层次的规律性。因此，需要进行灵敏度分析，来检验当模型参数被改变时结果是否也会变化。同样重要的是，要考虑不同的行动者行为是否能导致相同的结果，特别是一个更简单的模型是否能得到相同的结论（如果得到相同的结果，简单的模型通常应该比复杂的模型更受青睐，使用的原则是简单的解释比复杂的解释好，如果两者在解释上做得同样好的话）。

因此，在探讨了模型的宏观行为之后，接下来就应该将模型的结果与来自社会世界的经验数据做比较。正如我们将会在下文中看到的，将模型结果和数据做对比进行起来并不容易，而且经常并不会得到期望中的清晰的答案。大多数的模型都是随机的，即都涉及随机过程，所以人们可能并不

清楚模型输出和观察数据之间的差异是因为随机因素所致还是因为一个不好的模型所致。在收集有效和可靠的数据时也经常存在较大的困难，特别当需要与模型输出结果相比较的数据要通过观察很长时期才能收集到时更是如此。

最后，人们可以得出一些结论，期望可以回答开启此过程的研究问题。另外，如果人们对模型有信心的话，可以试验这个模型，从而确认先前不受怀疑的规律性。

# 第 1 节 发展基于行动者的模型的例子

在这一节中，我们引用一个“集合体”（Gilbert，2006）模拟作为例子来描述发展一个简单的基于行动者的模型的过程。在第 4 章中，我们将看到这个模型是怎样被编程的。

许多相互关联的社会现象是很难被模型化的，甚至很难被描述出来，因为它们的边界是流动的，涉及的人也总是处在不断地变化中，而且也不存在被所有参与者都共享的单一特征。一些例子如下：

（1）青年亚文化圈，诸如“朋克族”（Widdicombe & Wooffitt，1990）或“哥特派”（Hodkinson，2002）；

（2）科学研究领域或专业（Gilbert，1997）；

（3）艺术运动，诸如前拉斐尔派或旋涡画派（Mulkay & Turner，1971）；

（4）社区，诸如伦敦的诺丁山或纽约的布朗克斯（O'Sullivan & Macgill，2005）；

（5）武装革命或恐怖活动的成员（Goolsby，2006）；

（6）工业部门，诸如生物技术（Ahrweiler，Pyka & Gilbert，2004）。

虽然人们可以很容易地说出自己很熟悉的例子，而且尽

管这些例子非常普遍并且很容易被辨认出来，但是将某人关于它们的直觉放置于坚实的基础之上却是件很困难的事情。作为开端，还不存在一个普遍被接受的名词去命名这个现象。亚文化、领域、社区、专业和运动等术语都被用于特定的类型，但是这些术语中没有一个能恰当地描述它们的全部。一个密切相关的概念是“构型”（Elias，1939、1969），虽然严格说来这个概念应该只能应用于个人，而不能应用于组织或其他类型的行动者。在这一节中，由于缺少更专业的术语，我们使用词语“集合体”作为通用的术语。需要注意的是，组成集合体的单位可以是人（就像上面大多数例子里的那样），也可以是组织（如生物技术公司）。

获得对集合体的更好理解的第二个障碍在于，根据定义，在它们周围没有明确的边界。这意味着不可能去计算它们的成员，因此也不可能对它们随时间的发展以及它们的发生率等进行更常用的定量分析。

第三，集合体从它们成员的行动中产生的方式并不容易理解。此处发展模型的目的是说明一些关于个人行为（微观基础）看似合理的假设是如何能够产生在宏观层次上可观察到的集合体。

## 宏观层次规律性

所有集合体在或多或少的程度上都拥有以下这些内容。

（1）虽然集合体的例子通常在总体层次上比较容易命名和描述，但对其精确的界定被证明是相当棘手的，而且存在商议和争论的可能（举例来讲，有许多不同的地区也能够被

描述为诺丁山，范围涉及当地正式的行政区域到与之同名的电影拍摄地点）。

(2) 没有一个已经被大家接受的共识性界定能够被用来从那些“外部”者中区分出“内部”者来（或从非成员中区分出成员来）。例如，虽然从某人的穿着方式，人们可能认为他或她是一个“朋克”，通过指出这个人的信仰、行为或熟人，其他人（包括这个人本人）可能会对这个归类提出质疑。这些信仰、行为或熟人都可能与作出的关于成员身份的决定有选择性关联。特别需要指出的是，不存在一个可观察到的特征是所有“内部”者都具有但同时又是所有“外部”者都不具有的。例如，集合体并不是正式的组织，在正式组织中拥有书面或口头合同的雇员与组织成员相区别；也不是政治党派，在其中最少需要一份正式的支持声明并以此来界定成员；也不是社会阶级，在其中外部确认的客观标准被用于对人们进行分类（典型的是某人的职业）。

(3) 尽管如此，许多成员将共享共同的特点（例如，在一个研究领域的科学家可能有相似的教育背景，进行类似的前期研究，并且相互之间认识，因此即使不涉及技术、理论或研究对象，所有以上这些无一例外也都会在研究领域中涉及）。

(4) 集合体中的成员会被赋予拥有一些相关的知识（例如，专业领域的科学，或在青年文化中被认为是“酷”的事物，或诺丁山当地的地理环境）。然而，没有成员会拥有全部的知识：知识是社会性的。

(5) 被认为与集合体相关的特征的改变。例如，研究者不会无限期地连续研究完全相同的问题；一旦他们解决了一些问题，他们便向新的问题转移，不过仍然会在相同的研究

领域。大多数政治运动都会随着时间的推移而改变它们的宣言,以反映他们当前的想法和他们看到的发生在其周围的社会问题,尽管他们仍旧是相同的运动,拥有许多相同的追随者。青年文化总是在不停地变换被认为是流行的事物。

(6) 一些参与其中的人被广泛地认为(比如被其他人认为)与其他人相比他们是更中心的,更具影响力的,有更高地位的或是领导者。例如,一些科学家被认为比其他科学家更加杰出,一些亚文化圈中的成员比其他的成员更"酷",等等。

## 微观层次行为

在前一节中提到的集合体的一个共同特征是行动者——即组成集合体的人或组织——都有一些特殊的知识或信仰,尽管这些知识在集合体成员间是社会性分布的。例如,对于科学家而言,是关于他们研究领域的知识;对于青年亚文化而言,是关于目前流行什么的知识。因此,并不是每一个成员都有相同的知识,对知识的掌握通常是集合体的一个主要特征(Bourdieu, 1986)。在模型中,我们假设所有个体、成员或非成员,都有相同的知识,但是这一知识是什么在行动者之间是不同的,并且随着时间的推移而变化。我们用这一知识来为行动者定位:行动者某个时刻在一个抽象知识空间中的位置是他/她在那个时刻拥有知识的函数。

第二个假设是一些行动者具有比其他行动者更高的地位,而且所有行动者都被激励试图通过模仿高地位的行动者(通过复制他们的知识)来获得地位。例如,在一个受时尚驱动的集合体中,所有行动者都想要尽可能的时尚,这意味着

要接受被他们认为具有最高地位的那些人的服装款式、音乐品位或任何东西(Simmel, 1907)。然而,地位也是稀缺的函数:一个行动者并不能持续拥有高的地位,可能有许多其他的行动者具有非常相似的知识。例如,一个时尚偶像必须始终引领大众;一个科学家只有当他/她的研究与众不同时才能被频繁地引用;一个革命者只有在他/她与"小卒"相比较脱颖而出时才能赢得同事的尊敬。

第三,我们假设最高地位的行动者想要维持地位,但如果他们开始被受他们吸引的追随者排挤,他们就很难维持自己的地位。在这种情况下,我们假设高地位的行动者会被激励去进行创新,也就是在知识空间中去寻找还没有人群的临近位置。

因此,对行动者而言存在两个相互抵消的趋势——一方面,他们想要更接近于时尚;另一方面,他们想要具有排他性并且能够通过改变代表地位水平的位置来实现这种排他性。我们将会看到,处理这一张力在宏观层次上产生了典型的集合体模式。

## 设计一个模型

### 相关的模型

有一些一般化的模型来处理相似的问题。

(1) Boid 模型(Reynolds, 1987)的行动者试图与所有其他行动者都维持一个合适的距离,因此表现出随着协调运动而移动。行动者有三个转向行为:分离,以避开附近的行动者;调整,朝与附近行动者平均值的相同方向移动;结合,移

向附近行动者的平均位置。这个效应就是行动者像羊群或鱼群一样移动。这些模型展示了使行动者在“张力”中开展行动的影响:例如,分离行动与结合行动之间存在张力。然而,在这些模型中没有寻求地位或创新的观念。

(2) 创新模型(Ahrweiler & Gilbert, 1998)的行动者能够根据他们当前的知识来进行学习和行动。行动者也交换知识和创造新的知识。然而,在这些模型中没有关于集合体的具体构想。参与创新的一组行动者是被事先设定好的。

(3) 少数人游戏(Slanina, 2000)是来自众多文献中的一个例子。这个模型也被称为 El Farol 酒吧模型,模型中有行动者想要去酒吧,但只有当一小部分其他行动者也选择去那儿时这些行动者才会去。行动者根据他们自己以前在酒吧中遇到的行动者数量这一经验来作出决定。每个行动者都有一些策略可以用来与他/她最近去酒吧经历的记忆相结合,以对是否要在当前时间段去酒吧作出决定。这些策略根据它们成功与否被评分(当行动者到达酒吧时,是否过于拥挤),不成功的策略会被放弃。随着时间的推移,能够实现一个动态均衡,酒吧里行动者的数量与行动者用于判断这里有太多行动者的极限值相匹配。在这里,这个模型有某些问题解决导向的特征,但是没有集合体的表征。

**模型**

集合体模型由一个行动者能够在其上移动的平面组成。这个平面是一个圆环面,其中每一点代表一个特定的知识体或信仰集。因此,行动者并不是在一个物理空间的代表物里运动,而是在“知识空间”里运动。虽然在二维空间中(更准确地说是在一个圆环的平面上)呈现知识空间可能过于简

化，但这是为了更容易可视化。

行动者在知识空间中的运动代表了他在知识上的变化。因此，如果一个行动者模仿另一个行动者，就会看到他在知识空间中朝那个行动者移动。反之，如果这个行动者创造和发现了其他行动者不具有的知识，就会看到他离开其他行动者，进入空间中先前空白的区域。

行动者刚开始时在平面上是随机分布的。他们对于自己或其他行动者以前的位置没有记忆。每个行动者都做如下的行动：

(1) 计算与他直接相邻的其他行动者有多少；

(2) 如果行动者的数量超过了极限值，他将转向与邻近的其他行动者移动的大致方向相反的方向，然后移动一个随机的距离；

(3) 如果行动者的数量等于或低于极限值，他环顾四周的位置以找到一个相对满员的区域，然后从他现在所在的位置沿着那个区域中心的方向移动一个随机的距离。

每一个行动者都不同步地行动，无限地重复这一系列的行动。这个算法需要四个参数(参见图 3.1)：

(1) 环绕一个行动者的环形区域的半径，在此半径中行动者的数量被计算出来以决定这个行动者是否“拥挤”或“孤单”(局部—半径)；

(2) 行动者数量的极限值，低于它时行动者是“孤单的”，高于它时行动者是“拥挤的”(极限值)；

(3) 环绕一个行动者的环形区域的半径，在此半径中如果行动者是孤单的，计算行动者的数量以找出最大值在哪里；如果行动者是拥挤的，找出行动者运动的一般方向以决

定他将要移动的方向(可见一半径);

(4) 行动者移动的距离。距离是从这个参数的一个统一分布中随机选择出来作为最大值(速度)。

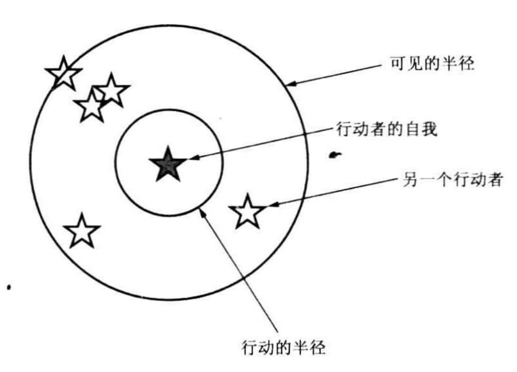



**图 3.1　集合体模型的参数**

### 检验

对集合体模型的检验和有效性验证我们会在第 4 章中再做讨论,安排在我们描述完如何对它进行编程之后。首先,我们需要考虑在检验基于行动者的模型时产生的一些普遍性问题。

# 第 2 节 | 检验:处理漏洞

你应该假设不管你多么仔细地设计和建构你的模拟,它仍将包含漏洞(做了与你想要的和期望的不同事情的编码)。当你第一次运行一个新的模拟模型时,它很可能有许多漏洞,其中大部分漏洞都很容易观察到,因为模拟会给出异常的结果或导致程序崩溃。更令人担心的很有可能是,即使当你已经在编码上进行了处理去除了明显的漏洞,但仍有一些漏洞会隐藏着,使你在未察觉时一直被困扰。经验法则把剩下的漏洞数量看做遵循了一个负指数函数——漏洞数量首先快速下降,然后趋于平稳,但从来不会触及 0。有时甚至已经发表的模拟也会受到漏洞和错误解释的困扰(Edmonds & Hales, 2003; Galan & Izquierdo, 2005; Rouchier, 2003)。

有一些技术可以减少含有漏洞的机会,而且能够使发现它们变得更加容易(Ramanath & Gilbert, 2004)。下面列举一些。

(1) 精细地编码。当你撰写模拟程序时,仔细稳重地去做,不要匆忙地使编码运行并寻求捷径,这样任何节省下来的时间会在去除漏洞时花费的额外时间中失去。使用对象导向的语言和在你的模型情境中具有意义的变量名称将会起到帮助作用。

(2) 包含大量的输出和诊断。如果编码不能给出输出结果以显示当程序运行时发生了什么的话,是很难在这样的编码段落中发现漏洞的。不要满足于只显示模拟的结果,即使在去除漏洞期间,你也需要显示中介值。同时也需要注意决定显示什么以便于你得到好的诊断,但也不能有过多的结果以至于你不能找到漏洞的症状,因为其他输出结果会将它们埋没。

(3) 一步一步地观察模拟。一次运行一条或一个功能的编码,观察变量值、参数值和属性值是如何变化的,并检查它们是否按照期望的方式在发生变化。虽然这种工作是缓慢和乏味的,但是它有助于确保编码按期望运行,至少对于能观察到的运行而言是有帮助的。通常,编程环境提供了使编码更容易被管理的特征。

(4) 增加断言。如果你知道变量必须取某些值而不是取其他值,当模拟运行时检查有效值,并在数值超出范围时显示警告(这样的检查被认为是断言)。例如,如果两个行动者不能占据相同的空间位置,那么在每一个时间段中都对此进行检查并在这一要求被违反时进行报告。

(5) 添加去除漏洞开关。你可能担心如果所有编码都需要辨别漏洞的话,诸如断言和诊断,将使模拟运行变得很慢而令人无法接受。可以在你的程序中包含一个能够设定达到去除漏洞水平的全局变量:从 0 到最大值。在每次去除漏洞陈述前都对这个变量进行一次检验,以查看陈述是否应该在目前去除漏洞水平上被运行(在某些语言中达到与条件编译相同的效果是可能的)。

(6) 增加评论并及时更新。所有编程语言都可以插入评

论——这是让编程员看的文本,并不会作为程序编码被执行。运用这个特性对每一个功能、程序、方法和对象添加评论。评论应该描述接下来的编码块是什么,以及这个编码块如何运行,但是这种描述只是在概念层次上而不是在执行层次上(即不是重复程序编码,而是说明编码想要实现什么目标)。一条经验法则是评论的行数大约是编码行数的三分之一。评语很容易过时,因为它描述程序以前的情况而不是现在的情况。应该预留一些时间来定期更新评论。在写评论时,假设读者是像你一样能够编程的人员,但对你的模型知之甚少或完全不知(在离开编程几个月之后,这可能是对你本人的一个很好描述,所以不要以没有其他人会看你的编码为借口逃避写评论)。

(7) 使用单元测试。单元测试是一个越来越流行的用以减少漏洞的软件工程技术(Link & Fröhlich, 2003)。它包括写一些测试编码并在写这些编码的同时去运行程序。这个构想就是在较小的相对自我包含的编码块或单元中发展程序。这样一个测试"工具"被创造出来为单元提供一系列的输入并将输出结果与一列期望结果做对照。然后这个测试工具将自动地运行每一个输入,检查实际产生的期望输出结果。一旦单元通过了测试工具的所有测试,你就可以继续写下一个单元。有时候可能要对第一个单元做一些修改,然后这些修改必须被再次放入测试过程以确保修改没有引入任何新的漏洞。当许多单元都已经被写好时,测试工具会被用来在全部单元上自动执行所有测试,因此可以基本确保漏洞没有作为编码发展的结果在不经意间掺杂进来。当程序发展时,应该写出一些另外的测试以验证多个单元的集合体以

及它们之间的互动。

（8）用已知情境的参数值测试。如果确切地知道了任何情境的参数值和输出结果，就对模型是否复制了期望行为进行测试。这是大多数人首先会用在模型上的测试，但是这个测试本身是一个相当弱的测试，不能有充分的信心保证模拟没有漏洞。

（9）使用拐角测试。用可能的参数极端值来测试模型并确保输出结果是合理的（这个名字来源于这种参数值标记了一个含有所有可能参数值的参数空间的角落）。例如，可以测试一下当你的模拟在没有任何行动者时运行会发生什么，以及当模型在拥有所允许的最大数量行动者时运行会发生什么。

# 第3节 | 有效性验证

一旦人们提出了一个基于行动者的模型，很明显就需要检查它的有效性，即实际中它是否是它意图要代表事物的一个好的模型。然而，有效性验证的理论和实践都比人们刚开始的预期要更复杂和更具争议性。这些议题与建模者瞄准的各种目标有关，这些目标暗示了有效性验证的不同标准，以及要求具有足够数量的合适的社会科学数据以允许进行系统有效性验证的艰难（Troitzsch）。我们在讨论有效性验证的一些技术之前需要先思考一些概念性问题。

基于行动者的模型主要用于将理论形式化（例如，谢林的居住隔离模型，参见第1章），在这种情况下模型很可能被定位在一个非常抽象的层次上；或者它们旨在描述一类广泛的社会现象，比如工业区的发展或消费者行为；或者它们被希望为一个特殊的社会情境提供一个非常具体的模型，比如在第1章中提到的一些电力市场模型，其中市场的明确特点，包括发电厂的位置和消费者的需求模式，都是相关的。这些类型的基于行动者的模型需要不同的方法去进行有效性验证（Boero & Squazzoni, 2005）。

## 抽象模型

抽象模型的目标是展示许多社会生活领域背后的一些基本社会过程。一个很好的例子是艾普斯坦(Epstein)和埃克斯泰尔(Axtell)开拓性的著作《成长的虚拟社会》(*Growing Artificial Societies*)(Epstein & Axtell, 1996),它展现了一个虚拟社会中经济的一系列连续逐渐复杂的模型。另一个例子是本章先前介绍的集合体模型。这些模型没有想要模型化任何特殊的经验案例,而且对于某些模型而言,可能很难发现其与观察数据有任何紧密的联系。例如,谢林的模型一般建立在一个规则的圆环形网格上,行动者被二分为两种类型(如红和绿)。模型的这些特征明显没有想要成为任何真实城市或真实家庭的经验描述。那么这样的模型如何才可能是有效的?

答案是将这些模型看做理论发展过程的一部分,并将通常应用于评价理论的标准应用于它们。也就是说,抽象模型需要在宏观层次上产生被期望的和可解释的模式;需要基于在微观层次上貌似合理的行动者行为准则;并且最重要的是能够产生进一步更具体的或"中层"的理论(Merton, 1968)。正是这些中层理论和基于它们之上的模型能够根据经验数据进行有效性验证。如果一个抽象模型是使用演绎策略创建的,就会存在一些关于行动者行为和期望的宏观层次模式的假设。因此第一个有效性验证测试就是评估模型是否的确产生了期望的宏观层次模式。更加彻底的测试将会看到当模型的参数被系统地改变时将会发生什么(参见第3章第

4 节,关于敏感性分析)。人们可能期望宏观层次模式在参数变化时维持不变,或者期望如果它们变化,这些变化也可以被解释。例如,在谢林的模型中,可以改变行动者的容忍度。当容忍度取较小值时,家庭很少能找到他们感到幸福的地点,并且模拟要花费很长时间才能达到稳定状态,如果它曾经达到过的话。当容忍度取足够大的值时,不管家庭的邻居颜色如何,他们都会感到满意,并且最初的居住随机分布模式也很难改变。

一旦这些基本的测试都已经通过了,就能够评估模型是否能够被用来向理论呈现具体的社会现象,然后就能够测试那些理论了。例如,谢林的模型,虽然是针对种族隔离问题提出来的,但却比这一问题更具普遍性和抽象性。它能被应用于行动者的任何角色。但是当被用于解释种族隔离时,人们就需要开始发展这一理论以将其他因素包含进来,这些因素对于决定城市中的处所位置无疑是重要的,包括支付能力和房屋储备的可得性,存在两个以上的种族群体,存在不属于任何种族或属于不止一个种族的人群,以及种族态度的函数形式。例如,布鲁赫(Bruch)和梅尔(Mare) 2006 年指出,谢林模型中的隔离效应取决于行动者对幸福或者不幸福有一种明确的态度,如果行动者在从幸福到不幸福的范围内有一个平缓连续的态度,就不会导致群体聚集的出现。

## 中层模型

我们在第 1 章中提到的那些模拟消费者行为,产业区域,以及创新网络的模型等,都被认为是“中层”模拟:它们都

意在描述一个特定社会现象的特点，只是以一种具有足够一般性的方式使它们的结论能够被广泛地应用于大部分的工业区域中而非仅此一个。

这种模型的普遍性特征意味着通常不太可能非常精确地将它们的行为与任何特定的可观察到的例子做比较。相反，人们期望满足于质上的相似性。这意味着模型的动力学应该与观察到的动力学相似，并且模拟的结果应该能显示与真实世界观察到的相同或相似的“统计信号”；也就是说，两者结果的分布应该在形状上相似(Moss, 2002)。

例如，人们在创新网络中找到的公司与在相同产业部门中的其他公司有合作性联系。如果计算每个公司合作伙伴的数目，并且绘制出合作伙伴数目的对数比上与这些合作伙伴有联系的公司数量的对数的图，这个图大致就是一条有固定斜率的直线(如，Powell, White, Koput & Owen-Smith, 2005:图3)。在取对数的变量之间的线性关系就是幂次法则的统计信号，而且它是许多社会网络的特点，包括从公共电力网络到万维网(Barabási, 2003)。我们可能期望创新网络的模拟也能够展现一个具有类似斜率的关于公司内部联系的幂次法则分布。

中层模型的一个例子是马莱尔巴、尼尔森、奥瑟尼格和温特(Malerba, Nelson, Orsenigo & Winter, 2001)关于电脑产业的研究。他们描述自己的模型是“历史—友好的”，其意思是尽管此模型不能复制电脑产业的完整历史，但是它能够

> 以一种格式化和简化的方式把握关于电脑产业进化决定因素的并具有鉴别力的理论的焦点。它能够用

与基本理论假设相一致的参数设定来复制出电脑产业历史上的主要事件。

他们也注意到,"在参数标准设定上的变化实际上会导致不同的结果,'另类历史'与可观察到的程式化事实的基本起因相一致"。

## 传真模型

传真模型旨在为一些特定的原型尽可能精确地提供复制品,通常是想要运用它对原型的未来状态作出预测,或者预测如果某些政策或规则被改变时将会发生什么情况。例如,一个商业公司可能对找出减少发出进货订单之间的时间间隔对他们库存水平的影响感兴趣。这就要求模型能够准确地表示他们所有的供应商,每一个供应商提供的货物,以及这些货物的单位数量等,以便能够作出合理的预测。另一个非常不同的例子是迪恩等人(Dean et al. , 1999)对美国西南部阿那萨吉印第安人的研究。大约在公元前 1800 年,这些印第安人在长屋河谷开始种植玉米,但到 3000 年后就放弃了这块区域。迪恩等人提出模型的目的就是回溯河谷中的定居模式并将这一模式与考古学纪录一户一户地进行匹配。

如果能够获得这样精确的匹配,它们就会非常有用,不仅能对作为模型基础的理论有一个强有力的证明,而且也有助于进行看似合理的预测。然而,有理由相信那些对特定现象的观察进行精确匹配的模拟可能是极少的并且可能只限

定于相当特殊的情况。大多数的社会模拟都包含了一些随机性的要素。例如,行动者可能具有从一个随机分布中被赋予的初始特征。如果行动者发生互动,他们的互动模式就可能是随机选择的,等等。相同的情况在现实社会中也被假设为是真实存在的:发生什么事情有一定程度的随机性。这种随机效应就是当运行模型许多次时,每一次都将产生不同的结果(在下一节中会对此做更详细的处理)。即使这些结果只有很小的类别,但人们希望出现的最好情况就是最频繁出现的结果——模型输出结果分布模式——与实际观察到的结果相对应(Axelrod, 1997a; Moss, 2002)。如果不能对应,人们可能就想要知道这是否因为发生在真实世界中的随机事件的特定组合是一个异常值,而且如果有可能多次"重新运行"真实世界的话,最常见的结果可能会与在模型中看到的结果更加相似!

# 第4节 | 有效性验证的技术

当验证模型的有效性时，有两个领域需要被检查：首先，是理论和理论模型之间的拟合度；其次，是模型和模型想要模拟的真实世界现象之间的拟合度。

## 比较理论和模型：灵敏度分析

对理论与其模型之间拟合度的最好评估是运用理论推演出一些关于变量间期望关系形式的命题，然后检验当模型用各种不同的参数设置运行时，这些期望分布实际上是否真的会出现。每一个参数设置都对应于模型作出的一个假设。人们或者通过测量源自于经验数据的值，或者通过敏感度分析来检验每一个设置。虽然前者更可取，但是有许多参数不能被实证检验，对于这些参数而言，进行某些形式的敏感度分析是必要的。

敏感度分析的目的在于理解模型产生期望结果的条件。例如，在第1章中描述的民意动力学模型中，人们可能会问，极端分子必须要多极端才能使所有行动者最终都加入到一个极端的派别中去？为了找到答案，需要对一系列不确定的参数值进行模拟，参数值的范围可能是从0.5到1.0并以0.1

为间隔(如,运行 6 次模拟)。但是,模型包含随机因素(例如,行动者“相遇”和交换意见的顺序是随机的),所以人们应该不会只满足于运行 6 次,而是会对每个不确定的参数值都运行许多次以获得一个平均值和方差。如果对每个参数设置重复运行 10 次(运行次数需要用考虑好的方差数量来选择,以便得到一个统计上有意义的结果),那么我们就需要执行 60 次运行。

但更糟的是,大多数模型都包含许多参数,而且它们之间的互动可能会影响模拟(如,出现极端分子群体的数量取决于极端分子的不确定性和极端分子在政治谱系中的分布,参数所具有的影响既是独立的也是组合的),因此,在理想状态下人们需要检验全部参数的所有值在所有组合下的输出结果。即使只有一些参数,也需要天文数字般的运行次数,因此这不是一个切合实际的策略。

如果我们将每个参数的范围想象成分布在一条轴线上,所有参数的集合就界定了一个多维的参数空间,在此空间中每一个点对应一个参数值的组合。在进行一个完整的敏感度分析时,任务的参数值范围能够被量化为这个空间的体积,而且任何削减空间的方法都将减少需要的模拟运行数量。一个明显的方法是使用以前的经验知识去尽可能多地限制参数范围。例如,我们可能知道一个参数虽然理论上能够取 0 到 100 之间的任何值,但实际上它从没有被观察到有大于 10 的值。另外,我们可以通过限定我们测试的参数值范围来限制模型的适用性:我们可以说只有参数在 5 到 10 之间的某处时模型才是适用的,我们不去考察当参数超出这个值域时会发生什么。

另一种方法是对参数空间进行抽样，它能够与限定参数范围联合起来使用。这种方法并不会在空间中每一个点上执行模拟运行，而是只使用某些点。这些点可以通过随机选择，或者是有意识地选择去检视我们特别感兴趣的组合，再或者是接近于那些模拟行为的主要变化被期望发生于其间的区域选择(相变)。

这种方法的精确版本将使用一种学习算法，如遗传算法(参见第5章第2节)，去搜索一个范围以确认某些输出结果变量取最大值或最小值的区域(Chattoe, Saam & Möhring, 2000)。

## 比较模型和经验数据

如在前一节中所讨论的，并不是所有的模型都被期望去匹配经验数据；可能得不到有效的数据去与那些以发展理论为目标的模型相比较，而且没有理由去进行经验测试。对于中层模型而言，检验的标准是看模拟生成的输出结果是否在性质上与那些在社会世界中观察到的结果相似，但是并没有期望两个结果在数量上也匹配。只有被我们称之为传真模型的模型才对模拟所得数据和经验数据之间的比较有严格的要求。在这一节中我们将考虑进行这一比较的一些方法。

社会科学家习惯将从模型中得到的数据与从现实社会中收集的数据进行比较：这种比较是在一般线性回归每次计算 $R^2$ (决定系数)时隐含进行的(Fielding & Gilbert, 2000)。这种情况下的模型就是回归方程，这种方程会计算因变量的预测值。同样，人们能够测量从一个模拟模型中得到的输出

变量值与经验观测值之间的拟合度(实际上就是两组值之间的相关系数)。然而,这种简单的程序却做了一些很强的假设,这些假设虽然通常能满足线性回归的要求,但却不太可能适用于模拟模型。

模拟模型的一个重要特征在于输出变量的值随着模拟的运行而变化。例如,在一个关于消费者行为的模型中,一个特定品牌的购买者数量在模拟过程中可能被观察到从0发展到大多数人。然后这个发展趋势可能会与真实产品的销售增长相比较。因为用于比较的数据是时间序列的,因此必须允许存在自相关的事实:在时间 $t+1$ 时的值并不独立于在时间 $t$ 时的值。被称为ARIMA的统计程序能用来比较这种时间序列数据(Chatfield, 2004)。

# 第 5 节 | 小结

在本章中，我们考虑了一些涉及设计和执行基于行动者建模研究的概念性问题。通过例子我们给出了在开始编程前需要进行的分析的类型，而且提到了在使模型具有可检验性和有效性时会出现的一些挑战。下一章我们将进入操作执行的内容：如何为模型编码，计划它的发展、发展模型，最后给出结果。

第4章

# 设计和发展基于行动者的模型

# 第1节 | 工具箱、程序库、语言、框架和环境建模

虽然某些建模者只使用一种常见的编程语言(任何语言都能使用,但最频繁使用的是Java)来建立他们的基于行动者的模型,但这是一种较难的开始方式。多年以来,许多模型都具有相同或相似的构建模块,相互之间差异也很小。为了不继续无谓地重复相同的工作,经常被使用的元素已经被集成到可以连接进基于行动者程序的程序库或框架中。其中第一个被广泛使用的是Swarm(http://www.swarm.org/),虽然现在这个程序库基本上已经被完全取代了,但它的设计影响了更现代的程序库,诸如Repast(http://repast.sourceforge.net)和Mason(http://cs.gum.edu/~eclab/projects/mason)。后两个程序库都是用Java写成的,所以最容易连接进同样也是用Java写成的模型中,但它们也能以其他语言来使用。Repast可以获得应用于.NET的版本并且能够很容易地连接进用C#,Visual Basic和Python写成的程序中。两者都具有一系列相似的特征,诸如以下这些:

(1) 各种有帮助的模型范例;

(2) 为事件驱动模拟提供的一个精确的调度程序;

(3) 一些将模型以及行动者移动的空间在屏幕上可视化

的工具；

(4) 将结果搜集进一个文件以用于后期统计分析的工具；

(5) 确定模型参数并在模型运行时改变它们的方法；

(6) 支持网络模型(管理行动者之间的连接)；

(7) 从模型到地理信息系统(GIS)的连接以便于环境能在真实地形上被模型化；

(8) 一系列去除漏洞的算法，用于进化计算(第5章第2节)，随机数的产生和神经网络的执行。

许多人多年的努力都用在了这些程序库的构建上，对它们的使用极大地减少了构建模型的时间和产生错误的机会。Repast 和 Mason 都是资源开放软件，非商业性使用可以免费获取。它们仅有的不足在于：第一，复杂性，这意味着在人们能够充分利用它们具有的广泛特征之前需要花费几个月的时间；第二，建模者被期望使用一个相对低层次的语言，如 Java，去发展他/她的模型。

更适合初学者的是建模环境，它提供了模型被创建和执行的完备系统，并且运行结果不用离开此系统就被可视化。这种环境往往更易于学习，人们在拥有一个运作的模型之前所花费的时间比人们使用程序库方法花费的时间缩短了很多。然而，简单化的代价就是灵活性更小、执行速度更慢。如果你需要它们提供更多的执行力和灵活性，就得投入时间去学习如何运用一个基于程序库的架构。

最初是为了其他目的建立的环境也能够被用于模拟，而且有时是非常有效的。例如，简单的模拟能够运用电子制表软件包 Microsoft Excel 创造出来，并且，免费的开放资源统

计软件包 R(http://www.r-project.org/)对于处理大批量数据也是很有用的。一些重要的基于行动者的模型已经通过使用数学软件包 MatLab(Thorngate, 2000)和 Mathematica(Gaylord & D'Andria, 1998)创建出来。尽管如此,为基于行动者的模型而特别设计的环境通常是首选。

## Repast

Repast(North, Collier & Vos, 2006)是一个有两个程序库的族。一个适用于 Java,一个适用于 Microsoft 的.NET,以及一个更可视的工具,这个工具允许使用脚本语言 Python 来发展模拟。这两个程序库在功能上是等同的,选择使用哪一个只取决于你对编程语言的选择。Python 系统更接近于模拟环境,并且不需要先进的编程技巧。

Repast 具有一个活跃的用户群——来自于学术界、政府和商业公司——和一个通讯列表,这在你遇到关于如何使用 Repast 的问题时会非常有帮助。Java 版本几乎可以在任何平台上运行,包括 Windows, Mac OS X 和 Linux。

## Mason

Mason(Luke, Cioffi-Revilla, Panait, Sullivan & Balan, 2005)是另一个 Java 程序库,它也受到了 Swarm 的极大影响。它同时提供标准程序库和 3D 可视化程序库,使用者能够在模拟运行时录制它的影像(这些特点在 NetLogo 中也可获得,参见下面的内容)。Mason 是免费的开放资源。

## NetLogo

目前，最受欢迎的基于行动者的模拟环境是 NetLogo (Wilensky, 1999)。它包含一个用户界面建设器以及其他的工具，例如系统动态建模器。出于教学和研究目的可以免费获取，可以从 http://ccl.northwestern.edu/netlogo/下载。它能在所有常用的操作系统中运行：Windows, Mac OS X 和 Linux。NetLogo 拥有一个活跃的用户社区，能够迅速和全面地回答使用者的问题，并且用户遍布自然科学和社会科学的所有教育层次。其他环境包括 StarLogo(http://education.mit.edu/starlogo/) 和 AgentSheets (http://agentsheets.com)，但是这些环境更适合创建和展示用于教学的简单模型而不适合在研究中建立模拟。

## 比较

表 4.1 在一些标准上使用了公认的主观判断，比较了 Swarm、Repast、Mason 和 NetLogo 环境。不存在对于所有使用者而言都是理想的环境。为了在它们之间进行选择，人们需要考虑自己本身的专业知识和编程经验、模型可能具有的复杂性，以及研究项目的目标（如，项目是不是探索性的，模型是不是非常简单，或者项目是不是为了建立一个相对复杂的模型并尽可能地与数据进行对比以测试它的行为）。Repast、Mason 和 NetLogo 仍在继续发展并在相当迅速地进化，所以表 4.1 中的信息需要与每个系统目前的状况进行对

照核实。其他的比较和回顾可以在卡斯特和克鲁克斯(Castle & Crooks, 2006)、吉尔伯特和班克斯(Gilbert & Banks, 2002)、瑞斯班克、莱汀恩和杰克逊(Railsback, Lytinen & Jackson, 2006)、托拜厄斯和霍夫曼(Tobias & Hofmann, 2004)的著作中找到。

**表 4.1 Swarm、Repast、Mason 和 NetLogo 的比较**

| | Swarm | Repast | Mason | NetLogo |
|---|---|---|---|---|
| 许可证* | GPL | GPL | GPL | 免费,但不是开放资源 |
| 文件 | 拼凑的 | 有限的 | 改进中,但是有限的 | 好的 |
| 用户群 | 正在减少 | 大 | 正在增加 | 大 |
| 建模语言 | 对象的—C, Java | Java, Python | Java | NetLogo |
| 执行速度 | 中等 | 快 | 最快 | 中等 |
| 支持图像用户界面的发展 | 有限的 | 好 | 好 | 用"点和击"很容易创建 |
| 嵌入能力以创建影像和动画 | 不能 | 能 | 能 | 能 |
| 支持系统性试验 | 有些可以 | 可以 | 可以 | 可以 |
| 学习和编程的容易度 | 差 | 中等 | 中等 | 好 |
| 安装容易度 | 差 | 中等 | 中等 | 非常容易 |
| 连接地理信息系统(GIS) | 不能 | 能 | 能 | 不能 |

注:* GPL:综合公共许可证,http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html。

NetLogo 作为最快能学会和最容易使用的程序库脱颖而出,但是它对于那些大而复杂的模型可能并不是最适用的。Mason 与 Repast 有可比性,但通常比 Repast 更快,它具有最新程序库的优势,吸收了早期系统的经验,但是只拥有一个明显小很多的用户群,这意味着只有一个较小的用户社区可以提供建议和支持。

# 第2节 | 使用 NetLogo 建立模型

在接下来的部分,我们将运用基于行动者的模拟环境 NetLogo(Wilensky, 1999)。NetLogo,如同上面提到的其他环境和程序库一样,在经历着持续的发展,每年都会出现一个主打的新版本。因此,在本书中列印出的编码(是使用版本 3.1 发展出来的)在将来的版本中运行可能就需要修改。然而,威伦斯凯(Wilensky)和他的团队努力使 NetLogo 升级改变具有兼容性,所以当你下载编码时任何需要作出的修改可能都会自动完成,或者仅仅只需要做微小的调整。

NetLogo 系统呈现给使用者三个标签:界面标签,信息标签和程序标签。界面标签用于使模拟的输出结果可视化并控制它(图 4.1)。信息标签提供了关于此模拟是用于什么和什么应该被观察到这样一些基于文本的文件。程序标签是人们使用针对这个环境的特殊语言(NetLogo 语言)写的模拟程序。NetLogo 是以编程语言 Logo 为基础的(Papert, 1980)。Logo 是为了教小孩关于程序和算法的概念而设计出来的,并且最初是用于控制称为"乌龟"的小玩具机器人。为了表示纪念,NetLogo 中的行动者仍然被称为"乌龟"。

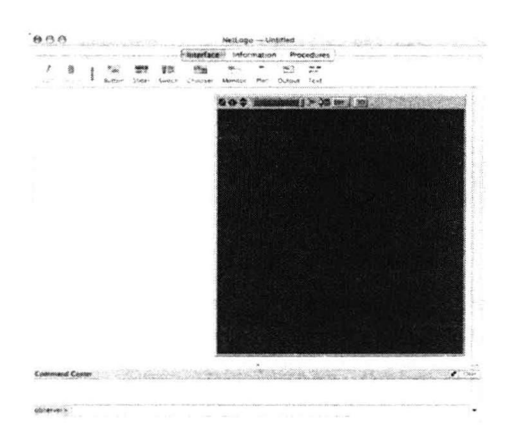


图 4.1 NetLogo 界面

界面标签里一个黑色的方格被称为视图，是由一格子的光点组成。这是行动者运动的空间环境：一个模拟程序可以指示行动者移向从光点到光点的任何方向，行动者在视图上是可见的(参见图 4.3，视图上的小三角形就是行动者)。通常，NetLogo 环境是被设置好的，以使左边缘与右边缘相衔接，上边缘与下边缘相衔接，所以，如果一个行动者移出了视图的左边缘，它立即会在右边缘重现(环境在拓扑上等同于环形面，一个圆环状的实体)。光点开始时是黑色但能很容易地被重新着色，因此，举例而言，人们可以创建一个等高线图。视图中光点的数量也能够被设置：当 NetLogo 启动时，视图由 35×35 的光点组成，但这个数目可以增至好几千。

一个 NetLogo 程序有三个部分。第一，一部分说明行动者将是怎样的以及对所有行动者而言都可获得的变量名称(全局变量)。第二，具有一个安装程序来初始化模拟。第三，具有一个进行程序，它被系统重复执行以运行模拟。图 4.2 展现了一个非常简单的例子以给出一个关于 NetLogo 程

序的初步印象，其中有 10 个行动者被创建出来并且无限期地随机做来回运动。

在这个程序中，没有全局变量，所以从安装程序开始。任何从先前一个运行中退出的乌龟（行动者）都会被清除出程序，10 个新的乌龟会被创造出来（这些乌龟会被放置在 NetLogo 视图的中央）。进行程序告诉每一个乌龟去执行方括号中的命令：首先，向右（如顺时针方向）转一个随机的度数，然后先前进一个单元，其中单元为一个光点边的长度。每个乌龟相对于其他乌龟都是在独立地移动，所有的移动都是同时的（因为 NetLogo 是在一个普通的电脑中运行，行动者不能都正好在相同的时间里运作，但是 NetLogo 通过使用非同步随机更新使行动者看上去好像都在同时移动，参见第 2 章第 3 节）。

```
to setup
  clear-all
  create-turtles 10
end
to go
  ask turtles [
    right(random 360)
    forward 1
    ]
end
```

图 4.2 生成 10 个行动者并使它们随机移动的 NetLogo 程序

为了能在你自己的电脑上运行这一程序，你需要下载和启动 NetLogo。然后点击程序标签并输入图 4.2 中显示的几行编码。返回到界面标签。点击位于上方的“按钮”图标，然后点击视图旁边的白色区域。NetLogo 将给出一个你应该

标注为“安装”的按钮。接着完成相同的操作后会看到“进行”按钮，同时设定复选框“永远”为打开状态（这将导致当“进行”按钮被点击时进行程序被循环执行，一直持续直到按钮被第二次点击才会停止运行）。点击你的“设置”按钮将创建 10 个乌龟，相互堆叠地显示在视图的中央。点击“进行”按钮将会指使乌龟（行动者）按照一个随机轨迹来回穿梭在视图上。再次点击“进行”按钮以停止这个程序。NetLogo 界面看起来应该类似于图 4.3。

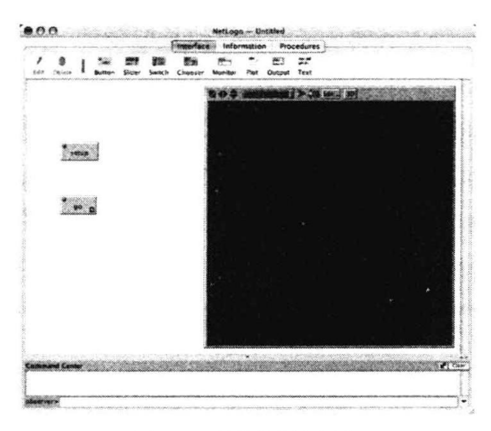



**图 4.3　简单的程序运行**

虽然这是一个非常简单的例子，但是它提供了一个关于人们能够多么迅速地在如 NetLogo 的环境中构建基于行动者模拟的构想。“按钮”（以及滑动条、开关等）图形可以通过“拖和放”来控制一个模拟。“视图”不需要进行任何编程就为行动者和它们环境的可视化提供了许多可能性。NetLogo 在界面标签上也能显示输出结果变量的动态变化图。虽然 NetLogo 编程语言与通常的程序语言有某些不同，但它既强大也简洁，使复杂的模拟能够用令人惊讶的寥寥几行编码就

能编程出来。

本书限于篇幅，不能给 NetLogo 提供一个详细的教程，但是这个系统自身就包含了很好的嵌入式教程（可以在“帮助”菜单下找到它），而且还伴有大量的演示和模型范例，其中有一些范例还与社会科学有关。

# 第3节 | 逐步建立集合体模型

在第3章中,我们介绍了"集合体"模型。简言之,这个模型模拟了基于知识的形成物——诸如科学家社区,时尚运动和亚文化群体——的动态创建和维持。这个模型的环境是一个空间环境,代表的不是地理空间,而是一个"知识空间",在这个空间里每个点都是知识元素的一个不同集合。行动者穿越这个空间,代表人们持有不同的(或改变了)知识和信仰。行动者只有非常简单的行为:如果他们是"孤单的",即远离行动者的局部集中区,他们就向群体移动;如果他们是"拥挤的",他们就离开。

因此,严格来讲,存在两种行动者行为准则:

| 条　件 | 行　动 |
|---|---|
| 行动者是孤单的 | 移向群体 |
| 行动者是拥挤的 | 从群体离开 |

建立模型的第一步是作出一些关于行动者和环境的基本决定。模型设定表明将只存在一种类型的行动者,并且行动者将在一个空间中移动。我们需要决定这个空间的维度:简化起见,我们将使用能够直接在NetLogo视图上绘制出来的一个二维网格。为了避免在网格边缘可能产生的特殊效果,我们将使用一个没有边缘的圆环面。这

是 NetLogo 的系统默认安排，所以不需要任何额外的设定。

下一步，最好用图形或者用“伪编码”来列出模型的逻辑。为了用图形来显示逻辑，使用统一的建模语言（UML）会比较方便，它是一种展现程序的方法，这种方法是作为一种独立于编程语言细节的沟通软件方法被提出来的（Miles, 2006）。UML 提供了一系列标准化的图形，能够用来显示程序中对象的种类层次。这些图形包括：顺序图显示了一件事情如何引起下一件事情，与流程图相似的活动图。UML 非常适合在一篇发表的论文中描述模型，但是集合体模型太简单以至于完全不需要用到 UML。例如，只有一个种类（对行动者而言）和只有两种行动者行为（前进和转弯）。

对于这种简单的模型，另一种可供选择的方法或许更有帮助——使用“伪编码”，这是一种自然语言和编程惯例非正式的混合体，它在不要求阅读者熟悉任何特定的编程语言的条件下能够使得程序的结构和流程是清晰的。图 4.4 显示了用伪编码写成的集合体程序。

**Initialization**

```
Create agents and distribute them at random in
  knowledge space
```

**Execution**

```
Loop forever
  Each agent:
      Counts the number of other agents within its
        local-radius
  Each agent:
```

```
        Compares the number of other agents within its
          local-radius with the threshold
        If the number is greater than the threshold
        Then(the agent is crowded)
          The agent locates that agent within
            visible-radius with the most agents
            surrounding it
          The agent moves a distance proportional to
            speed away from this agent
        Else(the agent is lonely)
          The agent locates the agent within
            visible-radius with the most agents
            surrounding it
          The agent moves a distance proportional to
            speed towards this agent
    End loop
```

**图 4.4 用伪编码写成的集合体程序**

这个程序有两部分:初始化(在 NetLogo 中称为“安装”)和执行(在 Net-Logo中称为“进行”)。伪编码的首行缩进有助于辨别哪行跟在哪行后面。例如,程序循环重复执行“Loop forever”和“End loop”之间的几行。模型中不变的参数用斜体字显示。

一旦人们有了程序的伪编码版本,将它转换成诸如 NetLogo 的编程语言就相对容易了,这样做的结果显示在图 4.5 中。图 4.6 是 NetLogo 环境中程序编码的截屏,图 4.7 显示了有建立模拟按钮(按此按钮执行初始化编码,从“setup”到下面 10 行的“end”语句)和运行模拟按钮(“进行”按钮,重复执行进行程序直到按钮被再次点击)的用户界面。

```
breed[agents agent]
agents-own[around visible]
to setup
  clear-all
  ask patches[set pcolor white]
  create-custom-agents 500[
    set color green
    set size 2
    ; distribute agents randomly
    setxy random-pxcor random-pycor
    set heading random 360
    ; ensure that each is on its own patch
    while [any? other-agents-here][fd 1]
    ]
end

to go
  ask agents[count-those-around]
  ask agents[move]
end

; store the number of agents surrounding me within
; local-radius units
; and the agents that I can see within visible-radius

to count-those-around
  set around count agents with[self! = myself] in-ra-
  dius
    local-radius
  set visible agents with[self! = myself]in-radius
    visible-radius
end

to move
  if any? visible[
    ifelse around > threshold
      [; if more than threshold agents surround me,
        I'm crowded:
          ; face away from the most popular patch and
            become red
```

```
            face-away set color red]
          [; else I'm lonely: face towards the most popular
           spot and
           become green
           face-towards
           set color green]
        ]
    ; and move in my(new)direction
    fd random speed
    ; ensuring that I stop on an empty patch
            while[any? other-agents-here][fd1]
end

;face towards the most popular local spot
to face-towards
    face max-one-of visible[around]
end
; face away from the most popular local spot
to face-away
    set heading towards max-one-of visible[around]-180
end
```

图 4.5　集合体程序

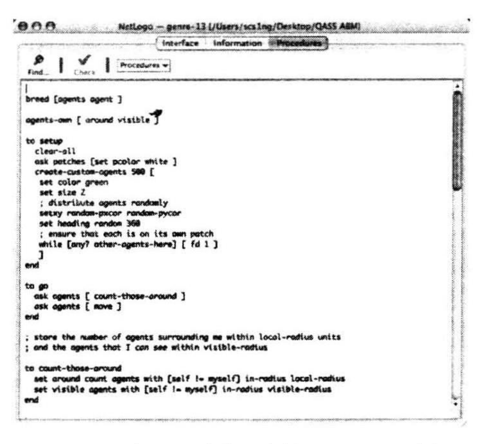



图 4.6　显示部分集合体程序的 NetLogo 程序标签

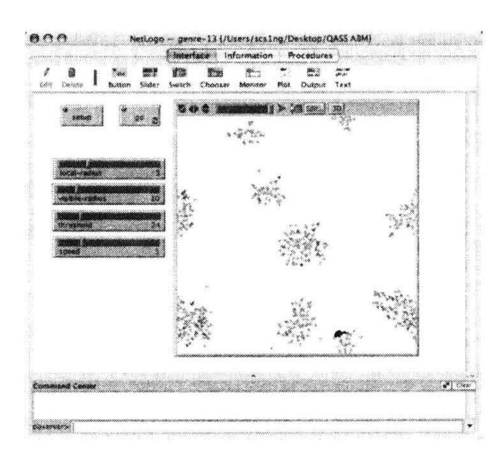


图 4.7 集合体界面

## 程序注释

这一节，在图 4.5 中的每一行程序都会被解释。

```
breed[agents agent]
```

这一行以复数形式和单数形式命名了将要在模型中使用的类别的名称。

```
Agents-own[around visible]
```

行动者类别有两个属性：遍及各处的和可见的。每个行动者在这两个变量上都有它自己的值，这两个变量分别储存了行动者周围其他行动者的数量和能够看到的行动者集合。

```
to setup
  clear-all
  ask patches[set pcolor white]
```

当使用者按下界面上的“安装”按钮时，安装程序就被执行。这个程序首先删除上次运行时剩下的所有行动者，然后

为网格上的所有光点都着上白色。编码 ask patches[…]告诉所有光点(光点是在网格上的单元格)去执行方括号中的编码。命令项 pcolor 是一个 NetLogo 变量,用于设定光点颜色。

```
creat-custom-agents 500[
  set color green
  set size 2
```

然后 500 个行动者被创建。在方括号里的命令被每个新的行动者独立地执行。视图上每个行动者的图像都被着成绿色,并且其大小被设定成最小值的两倍。

```
setxy random-pxcor random-pycor
set heading random 360
```

然后每个行动者都移到网格上的随机点上(random-pxcor 产生一个对应于网格左右边缘之间一个随机位置的数字,random-pycor 在上和下边缘之间的位置上完成同样的工作),heading(行动者面对的方向)用于设定面向一个随机的方向。

```
while[any? Other-agents-here][fd 1 ]
```

行动者随机分布的结果可能是两个或更多的行动者最后会在相同的光点上,一个行动者处于另一个行动者上面,所以这一行命令是让每个行动者去检查是否有任何其他的行动者也在同样的光点上。如果有的话,这个行动者就朝它现在面对的方向前进一个单位(fd 1),然后再次检查,继续前进直到它找到一个未被占据的光点。

```
    ]
end
```

到此就完成了每个行动者在被创建之后就立即执行的命令，也将此 setup 程序带到了终点。

```
to go
    ask agents[count-those-around]
    ask[move]
end
```

当界面上的"Go"按钮被按下时，go 进行程序就被重复执行。每次完成一遍此程序，模拟就前进一个时间段。在每个时间段中，所有行动者都被要求去清点网格上它们的局部区域中的行动者数量，然后所有的行动者都被要求进行移动。重要的是，在任何行动者移动之前，所有的行动者都要完成对它们周围行动者的清点工作；否则，行动者数目就可能会因为行动者在它们被清点之前就开始移动而被混淆。NetLogo 确保在下一个命令（在这个例子中，是第二个 ask agents[…]）开始前所有行动者都能完成构造中的命令，如 ask agents[…]。如果程序已经被写成 ask agents[count-those-around move]，就不会是这种情况了，因为每个行动者在它一完成清点任务之后就已经开始移动了，并且对于某些行动者而言，在其他行动者将它们加入计数之前这可能就已经发生了。这就是在对看起来同时行动的行动者进行编程时需要防止发生的一个关于时态问题的例子。

count-those-around 和 move 程序都是属于 agent 行动者类别的方法，即都是在程序编码中被界定去展现清点和移动对行动者而言意味着什么的程序。下面几行详细说明了 count-those-around 是由什么组成的。

```
to count-those-around
```

```
  set around count agents with[self! = myself]
    in-radius local-radius
  set visible agents with[self! = myself] in radius
    visible-radius
end
```

在这个程序的第一行，每一个行动者都拥有变量 around，它是被设定的位于局部—半径区域范围内的行动者数目。使用者在模拟开始前通过移动界面上的一个滚动条来设定局部—半径的值(图 4.7)。通过从 end 开始逆向操作的方法最容易看出这行编码在做什么。编码 in-radius local-radius 生成了那些与执行程序的行动者相距大约在一个局部—半径或以内的行动者。这组行动者集包含了行动者本身(它与自己相距 0 个单位，因此比局部—半径靠得更近)。而编码 with[self! = myself]排除了行动者自身，count 反馈了剩下的行动者数量。行动者属性 around 就被设定为这个数目。人们可以想象行动者环顾四周，计算它在局部半径 local-radius 之内看到的行动者数量并将此记忆在 around 变量中。在生产系统的术语中(参见第 2 章第 1 节)，around 是工作记忆的一部分。

下一行编码与前面行非常相似。它会找出能够被行动者看到的其他行动者有哪些，即哪些行动者在可见—半径之内，这是一个其值被界面上的另一个滚动条所设定的参数。第二行编码与第一行编码稍微有些不同，因为变量 visible 储存的不是可见的行动者的数量而是行动者自身的名字。这一步是必须的，以便于它们稍后能被辨认出来(在 face-towards 和 face-away 程序中)。

“移动”程序既决定行动者将要移动的方向，同时也执行

这个行动。用生产系统的术语讲，移动程序是一个非常简单的规则解释器。

```
to move
    if any? Visible[
```

这个程序通过检查对于执行这种方法的行动者而言是否存在任何可见的行动者开始。如果存在，行动者需要决定它是“孤单的”还是“拥挤的”，即它需要决定条件—行动准则是否都适用。

```
Ifelse around>threshold
  [
    Face-away
    Set color read]
```

“条件”包括检查在这个行动者周围的行动者数量是否大于用户界面上滚动条设定的门槛参数的值。如果大于的话，它就是“拥挤的”，行动者就必须远离群体的中心。程序face-away完成这个任务。另外，为了在视图上显示这些行动者，它们的颜色被转变为红色。

```
[
    face-towards
    set color green]
]
```

另一种情况是行动者是“孤单的”，它们必须移向群体并且变成绿色。

```
fd random speed
while[any? other-agent-here][fd 1]
end
```

一旦行动者已经设定好它的方向，它就能以一个被“速度”参数所决定的速率进行移动（随机速度会返回一个小于“速度”值的随机数字）。和前面一样，如果行动者坐落在一个已经被另一个行动者占据的光点上，它就继续沿着相同的方向向前移动直到找到一个空置的光点。

“移动”程序就此结束。我们仍然需要界定 face-towards 和 face-away。

```
to face-towards
    face max-one-of visible[around]
end
```

face-toward 命令检索行动者能够看到的行动者集合（已经被记忆在 visible 变量里的行动者），并找出那个集合中围绕在每个行动者旁边的行动者有多少。旁边有最多行动者围绕的那个行动者被认为是行动者想要移向的群体的中心。NetLogo 命令 face 设定了行动者面向的那个中心行动者的方向。

```
to face-away
  set heading towards max-one-of visible[around]-180
end
```

to face-away 命令与 face-toward 命令几乎是相同的，但移动方向与最中心行动者的方向却是 180 度相反。

集合体模型的程序编码到此就结束了。

运行模型显示出行动者的初始统一随机分布分离成了“聚类”，其中一些行动者在中心，其他行动者分布在它们周围。中心行动者是拥挤的，所以会移动。它们这样做时会稍微移动聚类的中心并可能使其他行动者变得或者拥挤或者

孤单，然后其他行动者也将移动。因此，行动者的聚类虽然会持续在一起较长时期(用时间段测量的话)，但它会漂移穿过视图。孤单的行动者会移向聚类，有时候会加入它，有时候会继续尾随其后。而聚类从来不合并。

图 4.8 展示了一个典型的模拟快照。在这个图中，拥挤的行动者是深灰色的，而那些孤单的行动者是浅灰色的。

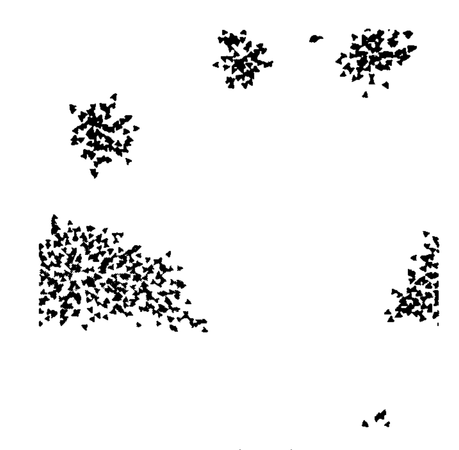


**图 4.8 模拟快照**

将这个模型的行为与第 3 章第 1 节中描述的集合体特征相比较，我们可以看到如下情况。

(1) 当我们运行模型时，我们看到“聚类”，但是在聚类周围划一个边界会涉及某些主观任意的界定，或许依据行动者的局部密度。

(2) 虽然关于哪些行动者在聚类内部哪些行动者在外部的界定是可能的(如根据到最近邻居的距离)，但这看上去仍然是武断的。

(3) 在相同聚类中的行动者是紧密聚合的，因此可能被认为共享了它们知识的某些方面。

(4) 聚类的方位通过它们中心的位置表现出来,但总是在不断地变化,因为一些行动者更紧密地移向聚类而另一些则寻找新的较不拥挤的地点。

(5) 某些行动者认为自己是拥挤的,并且这些行动者会和聚类中的其他行动者表现得不同(通过"创新"或通过尝试穿过知识空间来寻找较不拥挤的地方)。这些行动者在聚类中位于更中心的区域,并对设定其他行动者的移动方向具有影响力。

因此,我们在社会中观察到的集合体特征在模型中作为行动者行为的结果出现了。虽然其他微观层次的行为能够产生相同或相似的宏观层次模式(Gilbert, 2002),但了解产生我们观察到的宏观层次行为的这些微观行动是有用的。特别需要指出的是,如果模型满足下列条件,那么我们就能得出结论说,我们描述为"集合体"的现象将从行动者的行为中产生出来:

(1) 行动者改变它们在知识空间中的观念以应对"过度拥挤"(Mulkay & Turner, 1971);

(2) 某些观念和行动者被认为是地位高的或重要的;

(3) 行动者被激励去模仿和接受这些观念或者它们的变化。

对模型输出结果和经验数据更详细的比较对于这种抽象模型而言是不适用的(参见第 3 章第 3 节)。抽象模型的价值有两层:根据艾普斯坦的名言"为了解释宏观的社会模式,我们在行动者模型中产生——或'发展'——它们"(Epstein, 2007:50;也可参见 Epstein, 1999),它们能解释特殊现象的产生;而且它们有助于凸显现象之间的共同性和差异

性,否则这些现象可能被认为是不可比较的。因此,这种模型成功的更好标准是它在多大程度上产生了深层的理论问题或者提供了能够从经验上确认有效性的中层理论。例如,模型提出了这一问题:假定“朋克族”和“科学家”的社会形成能够通过相同的普通模型被复制出来,那么它们之间显著的相似性和差异性是什么?在许多社会生活领域都可以发现类似的微观行为以及相应出现的许多集合体,因此这种模型可以被应用于解释广泛的社会现象。

# 第4节 | 计划一个基于行动者建模项目

像任何研究项目一样，提前一步一步地计划好一个模拟项目是有帮助的，对你计划的可实现性也会更有信心，而且，如果你明显落后于计划的话，就能够开展补救性的工作。虽然大多数的模拟项目在本质上与使用其他研究风格的项目没有区别，但它有一些特别的特征需要注意。

(1) 不要低估它所要花费的时间。人们倾向于只考虑花费在写编码上的时间，但是，通常设计一个模型所花费的时间与写编码的时间一样长，并且经常要花费比写程序更长的时间去清除程序漏洞。因此，如果人们估计出写一个程序所需要的时间，然后最少将它乘以3来得出构建模型所需要的总时间，这一点也不悲观。除非使用一个如NetLogo的建模环境，否则大多数的编程时间就都将被发展用户界面和结果显示程序占用，而不是被模型编码本身占用。这就是为什么建模环境如此有价值的一个原因——它们能省去大量工作。

(2) 保存日志。想法构思会在项目进行的所有阶段随时出现，你会有忘记它们的风险，除非你在日志或实验记录中将它们记下来。你要对在建立模型时遇到的问题特别注意：你最初假设为只是技术性编程问题的困难可能具有广泛的

重要性。例如，如果模拟的结果看上去对一个参数的特定值非常敏感，这在建立模型时可能只是一个问题，但它也可能暗示关于这个参数在真实世界中起作用的某些实质性结论。

这里有一些额外的注意事项，那些有许多研究者在一个团队中工作的大型项目尤其需要当心。

(3) 找到合适的技术人员。如果你是一个单独的研究者，你会知道你已经在模型编程上掌握了何种程度的技术。如果是一个更大型的项目，需要一些分工，你可能需要招募一些具有建模专业知识的人。因为基于行动者的模拟仍然是一种新方法，具有丰富经验的研究者比较难找到，你可能需要雇用一些具有其他技术的人员并对他们进行基于行动者建模的培训。熟悉在 Java 中编程是特别有用的技术(即便你并不打算使用一个基于 Java 的程序库——参见第 4 章第 1 节——Java 课程给予的编程基础也是非常有用的)；在有待建模的领域有一些研究经验；以及清晰写作的能力，这在准备报告和论文时非常重要。

(4) 参加项目内部交流。如果不止一个人为项目工作，就需要注意确保每个人都相互理解并知道其他人正在做什么。虽然这在所有的团队工作中都是正确的，但在建模项目中，经常会有一些人是研究领域内的专家但对建模却知之甚少，还有另一些人是建模专家但对研究领域内的知识却知之甚少。双方可能都会对询问问题以及向其他人暴露自己的无知感到不自在。在大项目中，可能有必要安排特别的培训环节，其中在项目特定方面具有更多知识的那些人可以帮助其他人，以便将每个人都带到一个共同的知识和技术水平上。

（5）注意时间安排。大多数的建模项目都会设计一些数据收集和模型发展的工作。如果模型设定要等待经验数据的收集和分析，这在时间安排上可能比较棘手，但是数据的收集依赖于事先对测量对象的精确界定。除非保持注意，否则就会陷入第 22 条军规的困境，在这种情形下建模者和数据收集者都不能有所行动。

# 第5节 | 报告基于行动者的模型研究

学习如何报告基于行动者建模结果最好的方法是学习其他人已经做过的报告。以已经找到的有帮助作用或有趣的论文为例,仔细去看作者是如何构建它们以及什么使它们具有说服力。虽然基于行动者建模是一个比较崭新的领域,还没能发展出一套关于如何写作论文的健全的惯例规范,但是也有一些共同的要素(Axelrod, 1997a)。在瑞查迪、雷布鲁尼、萨姆和索尼萨(Richiardi, Leombruni, Saam & Sonnessa, 2006)的著作中可以找到一些有帮助性的论述。

一篇基于行动者建模报告或期刊文章的主要部分通常如下所示。

(1) 摘要,这应该指出(大致以此顺序)

a. 论文中思考的主要研究问题;

b. 论文的发现和结论;

c. 使用的方法(如基于行动者建模,抽样调查分析),以及对经验数据而言从中收集数据的样本。

(2) 序言,介绍论文中要解决问题的背景并解释这个问题为什么令人感兴趣。

(3) 文献综述,论述以前的研究,并指明为什么这篇论文报告的研究对以前的研究是有价值的补充或改进。关于研

究问题或领域的文献，还有关于相关模型的文献，甚至那些先前还没有应用到这个领域的模型都应该回顾。这一部分应该明确指出报告的研究中哪方面是一个进步以及它如何借鉴了以前的研究。

（4）对你想要解释的规律的陈述（这通常是对导言和综述内容的一个总结）。它们可以作为一组你想要证实（或证伪）的正式的假设被提出来，或者也可以通过不那么正式的形式呈现出来。

（5）对模型的描述。这个描述需要足够详尽，在原则上，它应该能使读者可以重新执行你的模型并得到相同的结果，但它不用包含程序编码（某些读者不会知道和理解你使用的编程语言）。作为替代，可以使用图表（如 UML）或伪编码来描述你的模型（参见第 4 章第 3 节）。特别要注意模型中事件发生的顺序：这在重新准确地运行模型时最容易导致问题出现。不要担心将与变量相关的公式包含进来，如果这些公式对精确地设定你的模型有帮助的话。

（6）参数描述。你为每个参数所选择的值都需要解释和合理化。一些值的选择可能是基于对社会世界的观察（如在劳动力市场模型中的就业率）；一些值的选择可能是合理的猜测，而且你已经用敏感度分析考察了它们的值变化时的影响；一些值的选择可能被用做“反向”推论，因为只有这些值给出了你想要用模拟去演示的输出结果模式。所有这些都需要被解释。

（7）结果描述。这几乎肯定涉及对图表的呈现和评论，这些图表显示了你从模拟运行中观察到的变量是如何相关的。要认真去弄清楚执行这些模拟的条件。例如，这些图是

否显示了多次模拟运行的平均值，如果显示了的话，运行了多少次以及运行之间的差异有多大（你可能考虑使用误差条线去显示差异程度）？如果你给出一个变量从零时间段随时间推移向前发展的趋势，那么就要确保你绘制的运行图足够长，从而能够清楚地表明这个趋势已经变得稳定并且不会正好在图形之外发生剧烈的变化（Galan & Izquierdo，2005）。如果你在一个特定的时间段上将变量的值关联起来，就要确保你说明了测量进行的时间段。

（8）采取了哪些模型检验（参见第3章第2节）和有效性确认（参见第3章第3节）步骤的讨论，以及读者对你的结果有多大信心的讨论。

（9）结论。这里应该提出列在（4）中的假设，并清楚地说明模型是否证明了它们是正确的，还是错误的，或者是还未能被证明。然后这一部分可以对序言中的构想做进一步发展，提出一个一般性的结论，可能的话对其中的意义进行一些思索（例如，如果这篇论文是关于劳动力市场的，就要考虑有什么样的政策可能在降低失业率上取得进展）。

（10）致谢。简要地感谢赞助者，基金提供者以及那些帮助你进行研究的人们。

（11）参考文献。只需要包含论文中引用的那些著作而不用列出其他。一般而言，对于你希望能够发表的期刊所要求的格式，你要确保提供完整的参考书目细节。

（12）附录（可供选择）。可以放置较大的表格或者可能是你模型的伪编码版本。

# 第 6 节 | 小结

这一章描述了执行一个基于行动者的模型的全过程，从选择一个工具箱到报告结果。最重要的步骤是在你完全投入这个工作之前就先计划你的工作。这对确保你有一个明确界定的要回答的研究问题，以及允许你有足够的时间和资源去回答它都将会有很大的帮助。

# 第5章

# 基于行动者建模的发展

基于行动者建模是一个快速发展的领域，新的方法在被不断地介绍。在这一章中，我们将简要介绍目前研究中的一些新的发展方向。

# 第1节｜地理信息系统

大多数基于行动者的模型都会有行动者在一块地域上移动，但通常这块地域是一个矩形平面或一个圆环面。在这些抽象的平面空间中，比较新的模拟环境为创建复杂的虚拟平面提供了可能性，或者引入了依据真实地貌绘制的地形图。它们是通过将一个地理信息系统（GIS）集成进模型来做到这一点的。GIS是一个管理、储存和显示空间数据（如地图）的软件系统（Chang, 2004; Heywood, Cornelius & Carver, 2002）。GIS研究本身就是一个专业，并且这也是为什么将GIS运用于基于行动者建模发展缓慢的原因之一：GIS有它们自己的软件技术和技巧，这些技术和技巧与基于行动者建模工具的融合存在一些困难。

GIS将空间数据存储在特殊建构或改编的"有空间意识的"数据库系统中。这些数据库系统是被设计用来有效地回答人们在管理地理数据时的各种问题，诸如"告诉我离这个对象不超过10个单位远的其他所有对象"。GIS数据一般被安排在图层上，图层将数据包含在一个或一些变量里。当展现或操作一幅地图时，人们可以打开或关闭一些图层，选择只在可见的图层里看到变量。例如，一幅地图可以分别在不同图层里包含道路和湖泊。如果有人想看公路网络，但对湖

泊不感兴趣，湖泊的图层就可以关闭。GIS 有两种类型：光栅和向量。光栅是规则的单元格网格，每个单元格储存一个值。光栅变量适用于在平面上连续变化的数据，比如日照的高度和时间。向量变量适用于以点，线或面为形式的数据（在 GIS 里被称为多边形）。空间数据可以用投影图来呈现，投影图是显示一个三维体表面的方法，诸如在一幅二维地图上的地球。存在众多不同种类的投射法可供选择，虽然对于应该使用哪种投射法这样的问题可能更困扰那些想要绘制整个地球的地理学家而不是只想绘制一个镇或地区的建模者，但是这些镇或地区已经足够小以至于在可选择的投射法之间的差异已经变得无关紧要了。

使用 GIS 建立一个行动者在较真实的地域上穿行（例如只沿着城市街道移动）的基于行动者的模型是有可能的。这对于诸如为交通流量（Raney, Cetin, Vollmy & Nagel, 2002）和流行病传播（Dibble & Feldman, 2004; Dunham, 2005）建模的项目而言是重要的，虽然这可能会分散注意力，因为人们的目的可能是为一个并不在任何特定地点的抽象过程建模。需要较早作出决定的是在整个模拟运行过程中是否将 GIS 地形的不变作为充分条件，或者说，地形是否需要剧烈变动。比如，静态地呈现一个城市对交通模型而言可能就足够了，因为在模拟呈现的时间段里（几小时或几天），城市街道的布局不会发生实质性的变化。另一方面，关于飓风对城市人口影响的模型可能需要在模拟过程中对模型地形进行更新，以考虑洪水、封闭的街道和暴风雨的破坏。然而，管理随时间变化的数据是 GIS 目前能达到的技术水平，但如果人们想要把它整合进基于行动者建模将会是一项

挑战。

在设计有空间意识的行动者时，需要考虑的第二个问题是这些行动者如何探测他们所穿越地形的特征的。例如，如果要保证行人沿着街道行走，并且不会穿过建筑物，对行动者而言就需要有一种方法用以决定前面的路是一条人行道。最好的解决办法是向 GIS 发送一个查询以决定行动者前方物体的位置，然后分解回复的答案以检验向前运动不会受到阻碍。原则上，这并不复杂，但在实践中，它可能被后台运行的 GIS 和行动者占用大量的进程空间并减慢模型运行的速度。这些都是当前这代模型构建者们所面临的问题，但在接下来的几年里，它们将会被解决，并且有空间意识的基于行动者的建模架构将变得更加普及并更容易使用。

# 第2节 | 学习

到目前为止，已经提到的大多数模型中的行动者都不能从经验中进行学习。受生产准则系统驱动的简单行动者具有记录他们当前和过去状态的记忆，所以当他们经过环境时会“学习”关于环境的状态。但通常我们所说的学习意味着比这更多的东西。一种是学习更有效率的准则，然后以改变行动作为学习的结果。在先前的一节中，我们简单接触了一种允许进行这种学习的技术；虽然神经网络（参见第2章第1节）并不是基于明确的准则，但它们进行的学习与准则学习相类似。此外，还有另外两种模型化行动者常用的学习技术：强化学习（RL）和进化计算。两者都是从人工智能中借用过来的，在人工智能中学习方法的发展是机器学习，这标志着下一个重要的主题。

## 强化学习

强化学习类似于当我们通过反复试错的方式探索一个新城市以发现旅游胜地时所做的事情：你尝试一条街道，如果它看起来前景不错你就继续，如果没有希望，你循原路返回再尝试另一条。进行强化学习的行动者具有一种状态（如

他们目前的位置)和一组可能的行动集合(如向北、东、南和西移动一个单元格)。环境被创建起来,它最终也将作出回报(到达名胜时的喜悦)。行动者必须找到一个能最大化他所获取的回报的策略(Sutton & Barto, 1998)。通常,在通往目标的道路上每多出一步都会减少最终的回报,所以目标并不仅仅是发现回报,而是要用最有效率的方式去实现它。行动者能够尝试很多次去找到最好的策略,探索不同的路径,所以,设计强化学习算法中的一个问题就是在探索(尝试新的路径,但可能是不太有效率的和浪费时间的)和开发(保持旧的途径,但可能并不是最好的方法)之间的平衡。强化学习已经被用于模型化公司学习其顾客的偏好(Sallans, Pfister, Karatzoglou & Dorffoner, 2003)和组织的决策制定(Sun & Naveh, 2004)以及其他现象上。一些作者已经用强化学习的简单模型去解释和预测在人类主体的实验性博弈理论情境下的行为(Chen & Tang, 1998; Erev & Roth, 1998; Flache & Macy, 2002; Macy & Flache, 2002; Mookherjee & Sopher, 1994, 1997)。

强化学习很适用于环境和报酬结构在模拟运行期间保持不变的问题。另一方面,如果环境是动态的,强化学习就会表现不佳。特别需要指出的是,如果所有行动者都在学习,而且一个行动者的行动会影响到其他行动者的状态和回报,那么使用强化学习就可能不是一个好的选择。

## 进化计算

与学习非常不同的方法是进化计算,这组技术中最简单

和最为人所知的是遗传算法(其他的有进化编程、进化策略、遗传编程和学习分类器系统)。进化算法(Eiben & Smith, 2003; Engelbrecht, 2002)基于自然选择并涉及两个基本过程:选择和繁殖。进化计算的基础是一个群体,它的成员通过繁殖形成个体的连续世代,这些个体继承了它们父母的特征。成功繁殖的概率是由个体的适应性决定的:适应的个体比不适应的个体更有可能进行繁殖并将它们的特征传递给它们的子代。

进入遗传算法(Holland, 1975)的个体有可能,但并不需要,成为模拟中的行动者。例如,在一个关于产业部门的模型中,行动者是公司,这个产业部门作为一个整体,通过公司的倒闭和成立的世代更替学习如何在产业区域中变得有生产力(Marengo, 1992)。另一方面,每个行动者都可能学习使用作用于行动者准则的遗传算法,一旦考虑遗传算法,每个准则就都成为一个"个体"(这就是学习分类器系统运作的方法)(Bull, 2004)。股票市场交易的模拟就是用这些行动者建立起来的(Johnson, 2002; LeBaron, Arthur & Palmer, 1999)。

对于遗传算法而言,每个个体都必须有它自己编码于染色体中的特征。编码可能是二进制字符串的形式,0 代表特征的缺失,1 代表存在,或者代表一个更复杂的结构。同样重要的是,对每个个体的适应性进行评估是可能的。例如,适应性可以通过公司行动者的积累资本存量测量出来,或者通过利他主义模型中的合作策略的有效性测量出来。个体依据它们适应性的比例被遗传算法选择出来进行繁殖,所以具有很强适应性的个体就非常有可能进行繁殖,而非常不适应的个体则不可能进行繁殖。繁殖通过运用一个被称为"交

叉"的过程将父母的染色体进行结合来完成。染色体切片从每条染色体中提取出来并结合成一个新的染色体，它的一部分来自于父亲或母亲一方的染色体，还有一部分来自于其他行动者。另外，为了确保即使在进行了许多混杂繁殖之后，群体中仍然能够继续存在某些差异，子代的染色体中的一些片断会被随机改变或变异。

子代的适应性会被评估以决定他繁殖孙代的可能性。最终，那些相对而言不适应的个体逐渐灭绝，并被那些由于继承了父母的适应性而更可能使他们自身具有适应性的个体所取代。虽然并没有个体进行任何学习来作为遗传算法的结果，但是群体作为一个整体却被认为在进行学习或最优化，因为其中的个体变得更适应了。

遗传算法是一个非常有效的最优化工具，但它是否是社会现象的好模型则有更大的争议性(Chattoe, 1998)。一个难点在于通常很难知道测量"适应性"的合适方法是什么，甚或很难知道当把这个概念应用于社会现象时它是否有任何清晰的意义。有时候，这并不重要。比如，在一个简单社会的模型中，人们并不需要对适应性有一个仔细推敲的定义：如果行动者有机会并且在这之前没有因为缺乏资源而死去，它们就能被设计出来进行繁殖。基本遗传算法的另一个普遍问题在于，将一个行动者所有显著的特征都编码成染色体的二进制字符串是困难的。然而，其他进化算法技术允许更多种类的结构。例如，遗传编程(Banzhaf, 1998; Koza, 1992、1994)用程序编码来替代二进制字符串；学习分类器系统(Bill, 2004; Meyer & Hufschlag, 2006)使用条件—行动准则作为染色体的等价物。

# 第3节 | 模拟语言

多行动者模型一个最显著的特征是，行动者有互动的潜力。正是这一点将多行动者模型与微观模拟或基于公式模型(参见第1章第4节)区分开来。互动可能表现为对其他行动者存在的一个简单感知，去避开他们或模仿他们，或者，互动也可能是涉及知识、观点或信仰的更复杂交流，这取决于被模拟领域的要求。然而，即使是在最精致的模型中，通常的情况也是行动者的互动是通过行动者对行动者无中介的、直接的信息传递而产生的。这与人类的交流有很大差别，在人类交流中，我们的思想(和意图)必须通过一个外在的自然语言来表达，这种自然语言必然是模糊不清的，它的意义必须通过学习获得而不是与生俱来的。

除了不真实之外，从行动者到行动者直接信息传递的模型会对更广范围的社会现象留下一个误导性的印象，从合作到领导，当通过使用从一个行动者准则系统直接传到另一个系统的无误的和清楚的信息进行模型化时，所有这些社会现象都改变了它们的特征。为了部分地回应这个问题，同时因为在语言学中关于语言如何演化是一个重要的课题，因此关于“语言进化”的研究在过去的十年里在数量上开始逐渐增多并精致化(Perfors, 2002)。这种工作许多都是专业化的、

复杂的，在此我们对该话题只做一个相当简单的介绍并提供一些关于语言如何能够进化的线索。

假设我们有两个行动者，亚当(Adam)和贝蒂(Betty)，他们在一个虚拟的地形中站在彼此的附近。两者都能看到一个红色的小球和一个蓝色的大立方体，以及附近其他一些对象。亚当想通过话语(通过从一个行动者向另一个行动者传送一串字符来执行)将贝蒂的注意力引向红球。最初，行动者没有一种共享语言用以谈论他们能够看到什么。虽然亚当能够表达音节的某种次序，但是贝蒂根本不能理解这一次序的意义，并且没有办法知道亚当正在提到球而不是正方体抑或是他们都能够看见的其他物体。问题甚至比这更复杂，因为刚开始时亚当并没有"球"或"立方体"的概念，两个行动者开始时具备的只有探测诸如颜色、形状、大小和方位等特征的能力。其余的一切都必须学习，目标就是进化出共享的词汇，就是一个"对一组差异的共识"(Hutchins & Hazlehurst, 1995:151)。

下面是亚当和贝蒂可以使用的一个算法(Vogt, 2005; Vogt & Coumans, 2003)。亚当开始时看着球，并看到它是圆的、红的和小的。这些特征都将球与方的、蓝的和大的立方体区分开来。亚当能够将它归类为一个"圆的、红的、小的"物体，并且亚当从此以后就能将这些球与方的、蓝的、大的物体区分开来。如果在场景中有两个圆的、红的、小的物体，亚当就需要再找出其他特征以将球与另一个物体区分开来，比如说物体与亚当的距离。对亚当而言，"红色"可能就是一系列色度：具有不同的类别因而针对每种红色色度都有一个不同的名字，但这没有多大的帮助，所以颜色空间就被

行动者的感知系统粗糙地割裂成许多小段，并且相同的过程也被应用到对其他特征诸如形状和距离的感知上。

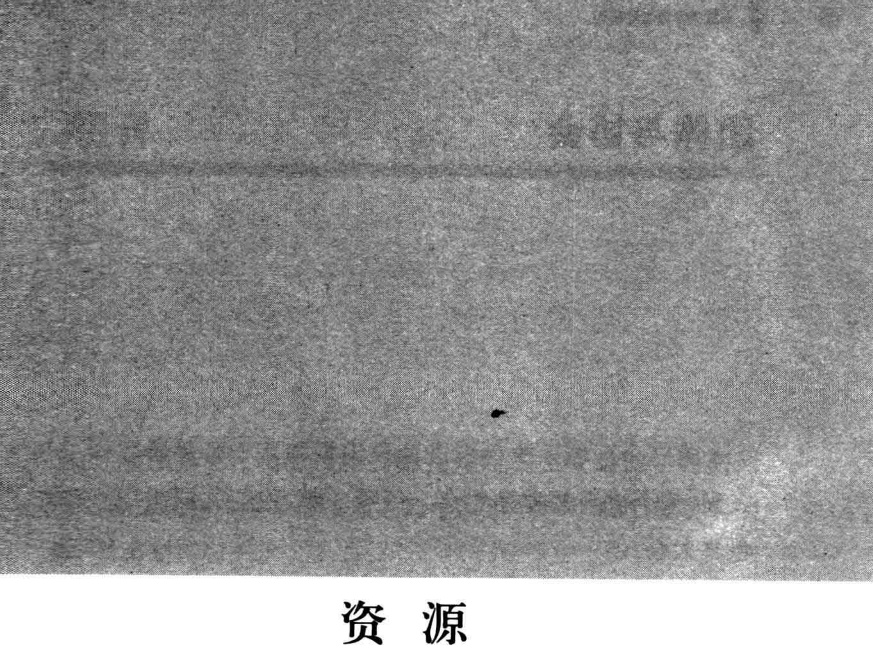
通过这种方法，亚当能够以他的视角来区分物体，赋予每个物体一组范畴，这组范畴是被选出来用于使物体能够与以前遇到的或目前在场的其他物体相区别。这组范畴被称为概念。所有这些都是在行动者的“头脑”中发生的。贝蒂也将看到这个场景并且也会为球提炼出一个概念，这个概念很可能与亚当的概念相似（但是因为他们站在不同的位置上，所以对球拥有不同的视角，贝蒂的概念就可能与亚当的概念不完全相同）。亚当现在必须用一句话把“球”的信号传送给贝蒂。假设这是亚当第一次谈论球，他就要为他的概念发明一个词——任何字符串都行，只要不同于他所知道的任何其他词。亚当“表达出”这个词并与贝蒂交流。然而，贝蒂在这个阶段还不明白这个词的意义。

为了学习一个共同的词汇，亚当和贝蒂参与了一个语言游戏（Steels, 2004）。这涉及重复进行的对话，其中有一个分值测量贝蒂所有概念之间的相关性，而且，我们正在讨论的词汇依据她是否断定自己已经成功地理解了话语而被更新。这个断定能够基于某些非言语的强化（如，亚当指向物体，贝蒂基于对单词的理解或者亚当对贝蒂成功完成一个行动的奖励）或是在其他情景中对此单词的相似使用，虽然后者需要做更多的推论并更容易出错。当贝蒂选择了一个概念与此单词相联系（或更准确地说，是将她知道的每个概念与被这个单词表达的可能性相联系），她就扮演了讲话者的角色。如果她想要表达“圆的、红的、小的”球时，她将选择与那个概念联系最紧密的单词，即她现在已经从亚当那里学会的

单词。

这些技术(诸如我们已经勾画出的一种技术)将允许行动者去发展一种共享词库用来描述他们都能看到的场景。但这仅仅只是一个开始,为了进行有效的交流,行动者需要一种共享的语法以及句法。他们不仅能够把使用语言作为传递说明的一种方法,同时也能把使用语言作为执行诸如命令、询问、说服等行动的一种方式。我们仅仅只是探索如何构建行动者能够在其中发展出此类能力的系统(Cangelosi & Parisi, 2002),但在今后十多年里如果在这方面没有巨大进步的话,将会让人非常惊讶。





资　源

# 团体与协会

有三个区域性协会推进社会模拟和基于行动者建模的发展，每个协会都举办年会。每隔一年，他们共同组织一次世界大会。

- 北美计算机社会和组织科学协会（North American Association for Computational Social and Organization Science[NAACSOS]）。网址：http://www.casos.cs.cmu.edu/naacsos/。
- 社会系统科学中基于行动者方法的环太平洋亚洲协会（Pacific Asian Association for Agent-Based Approach in Social Systems Sciences[PAAA]）。网址：http://www.paaa.econ.kyoto-u.ac.jp/。
- 欧洲社会模拟协会（European Social Simulation Association[ESSA]）。网址：http://essa.eu.org/。

你可以缴纳适量的年费加入这些协会，他们对进入基于行动者建模研究社区提供了非常有用的帮助。

# 期刊

使用基于行动者建模的研究既出现在特定的学科期刊中，也出现在关注社会模拟的跨学科期刊中。两个最著名的跨学科期刊如下。

- 虚拟社会和社会模拟（*Journal of Artificial Societies and Social Simulation*[*JASSS*]）。这是一个在线电子期刊，在互联网上就可以阅读。它是免费提供的。在 http://jasss.soc.surrey.ac.uk/JASSS.html 这个网站的首页上，你只需注册便可以在每一期发行时收到一封电子邮件（每年四期）。
- 计算机和数学组织理论（*Computational and Mathematical Organization Theory*[*CMOT*]）。这是一本印刷的纸质期刊，但也有一个在线收费的版本：http://springerlink.metapress.com/content/1572-9346/。

其他偶尔发表基于行动者建模论文的期刊包括：

- *Artificial Life*
- *Complexity*

- *Computational Economics*
- *Ecology and Society*
- *Emergence: Complexity and Organization*
- *Environment and Planning B*
- *Environmental Modeling and Software*
- *Journal of Economic Dynamics and Control*
- *Physica A: Statistical and Theoretical Physics*
- *Simulation and Gaming*
- *Simulation Modeling Practice and Theory*
- *Social Networks*
- *Social Science Computer Review*

# 通讯名单和网址

SIMSOC 的电子邮件发送名单会定期发布即将召开的会议、工作坊和基于行动者建模者可能会感兴趣的工作。你可以在 http://jiscmail. ac. uk/lists/simsoc. html 这个网站加入这个名单或查看名单文件。

有一个由 Leigh Tesfatsion 维护的被称为"基于行动者的计算机经济学"的精彩网站。上面有许多精心分类的、能够连接到一系列范围广泛的文献的链接。网址：http://www. econ. iastate. edu/tesfatsi/ace. htm。

本书的网址为 http://cress. soc. surrey. ac. uk/qasss/。在这里你能找到集合体模型的编码和连接到基于行动者建模资源的链接。

## 注释

[1] 尽管如此，在许多情境下，诸如在模型化股票市场时，我们已经发现，缺乏理性(或者“0智商”)的行动者的集合行为与在宏观层次上观察到的行为惊人地匹配(Chan, LeBaron, Lo & Poggio, 1999; Farmer, Patelli & Zovko, 2005)。

[2] 许多不同作者的后续论文已经使用这些标签来探讨行动者群体之间差异的出现(如 Edmonds, 2006; Hales, 2000、2002; Riolo, Cohen & Axelrod, 2001)。

# 参考文献


Acerbi, A., & Parisi, D. (2006). Cultural transmission between and within generations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *9* (1). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/9/1/9.html.

Ahrweiler, P., & Gilbert, N. (Eds.). (1998). *Computer simulation in science and technology studies*. Berlin: Springer.

Ahrweiler, P., Pyka, A., & Gilbert, N. (2004). Simulating Knowledge Dynamic in Innovation Network(SKIN). In R. Leombruni & M. Richiardi(Eds.) *Industry and labor dynamics: The agent-based computational economics approach*. Singapore: World Scientific Press.

Albino, V., Carbonara, N., & Giannoccaro, I. (2003). Coordination mechanisms based on cooperation and competition within industrial districts: An agent-based computational approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *6* (4). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/4/3.html.

Allen, P. M. (1997). *Cities and regions as self-organizing systems*. Amsterdam: Gordon and Breach.

Axelrod, R. (1997a). Advancing the art of simulation in the social sciences. In R. Conte, R. Hegselmann, & P. Terna (Eds.) *Simulating social phenomena* (pp. 21—40). Berlin: Springer.

Axelrod, R. M. (1997b). *The complexity of cooperation: Agent-based models of competition and collaboration*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Axelrod, R. (1997c). The dissemination of culture. *Journal of Conflict Resolution*. *41* (2), 203—226.

Axelrod, R. M. & Dawkins, R. (1990). *The evolution of cooperation*. Harmondsworth, UK: Penguin.

Bagnall, A. J. & Smith, G. D. (2005). A multiagent model of the UK market in electricity generation. *Evolutionary Computation*, *9* (5), 522—536.

Banzhaf, W. (1998). *Genetic programming: An introduction: On the automatic evolution of computer programs and its applications*. San Francisco: Morgan Kaufmann.

Barabási, A.-L. (2003). *Linked: How everything is connected to every-*

*thing else and what it means for business, science, and every day life.* New York: Plume.

Barabási, A.-L. & Albert, R. (1999). Emergence of scaling in random networks. *Science*, *286*, 509—512.

Barreteau, O. (2003). Our companion modeling approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *6*(2). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/1.html.

Barreteau, O., Bousquet, F., & Attonaty, J.-M. (2001). Role-playing games for opening the black box of multi-agent systems: Method and lessons of its application to Senegal River Valley irrigated systems. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *4*(2). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/2/5.html.

Barreteau, O., Le Page, C., & D'Aquino, P. (2003). Role-playing games, models and negotiation processes. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *6*(2). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/10.html.

Batten, D., & Grozev, G. (2006). NEMSIM: Finding ways to reduce greenhouse gas emissions using multi-agent electricity modelling. In P. Perez & D. Batten (Eds.), *Complex science for a complex world* (pp. 227—252). Canberra: Australian National University.

Beltratti, A., Margarita, S., & Terna, P. (1996). *Neural networks for economic and financial modeling.* London: International Thomson Computer Press.

Benenson, I., Omer, I., & Hatna, E. (2002). Entity-based modeling of urban residential dynamics: The case of Yaffo, Tel-Aviv. *Environment and Planning B*, *29*, 491—512.

Boden, M. A. (1988). *Computer models of mind: Computational approaches in theoretical psychology.* Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Boero, R., Castellani, M., & Squazzoni, F. (2004). Micro behavioural attitude and macro technological adaptation in industrial districts: An agent-based prototype. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *7*(2). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/2/1.html.

Boero, R., & Squazzoni, F. (2005). Does empirical embeddedness matter? Methodological issues on agent based models for analytical social sci-

ence. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *8*(4). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/4/6.html.

Borrelli, F., Ponsiglione, C., Iandoli, L., & Zollo, G. (2005). Inter-organizational learning and collective memory in small firms clusters: An agent-based approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *8*(3). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/3/4.html.

Bourdieu, P. (1986). *Distinction: A social critique of the judgment of taste* (R. Nice, Trans.). New York: Routledge.

Brenner, T. (2001). Simulating the evolution of localized industrial clusters: A identification of the basic mechanisms. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *4*(3). http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/3/4.html.

Brown, L., & Harding, A. (2002). Social modeling and public policy: Application of micro-simulation modeling in Australia. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *5*(4). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/4/6.html.

Bruch, E. E., & Mare, R. D. (2006). Neighborhood choice and neighborhood change. *American Journal of Sociology*, *112*(4), 667—709.

Bull, L. (2004). Learning classifier systems: A brief introduction. In L. Bull (Ed.), *Applications of learning classifier systems* (pp. 3—14). New York: Springer.

Bunn, D. W., & Oliveira, F. S. (2001). Agent-based simulation: an application to the new electricity trading arrangement of England and Wales. *Evolutionary Computation*, *5*(5), 493—503.

Cangelosi, A., & Parisi, D. (2002). *Simulating the evolution of language*. London: Springer.

Carley, K. M. (1999). On generating hypotheses using computer simulations. *Systems Engineering*, *2*(2), 69—77.

Castle, C. J. E., & Crooks, A. T. (2006). *Principles and concepts of agent-based modeling for developing geospatial simulations*. University College London. Retrieved from http://www.casa.ucl.ac.uk/publications/workingPaperDetail.asp? ID=110.

Cecconi, F., & Parisi, D. (1998). Individual versus social survival strategies. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *1*(2). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/1/2/1.html.

Cederman, L. -E. (1997). *Emergent actors in world politics: How states and nations develop and dissolve*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Chan, N., LeBaron, B., Lo, A., & Poggio, T. (1999). Agent-based models of financial markets: A comparison with experimental markets. *MIT Artificial Markets Project, Paper No. 124, September*. Retrieved from http://ebusiness. mit. edu/research/papers/124% 20% Poggio%20Lo,%20Agent-based%20Models. pdf.

Chang, K. -T. (2004). *Introduction to geographic information systems* (2nd ed. ). Boston: McGraw-Hill.

Chatfield, C. (2004). *The analysis of time series: An introduction* (6th ed. ) Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC.

Chattoe, E. (1998). Just how(un)realistic are evolutionary algorithms as representations of social processes? *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *1*(3). Retrieved from http://jasss. soc. surrey. ac. uk/1/3/2. html.

Chattoe, E., Saam, N. J., & Möhring, M. (2000). Sensitivity analysis in the social sciences: Problems and prospects. In K. Troitzsch, N. Gilbert, & R. Suleiman (Eds. ), *Tools and techniques for social science simulation*. New York: Physica-Verlag.

Chen, Y., & Tang, F. (1998). Learning and incentive-compatible mechanisms for public goods provision: An experimental study. *Journal of Political Economy*, *106*, 633—662.

Clark, W. A. (1991). Residential preferences and neighborhood racial segregation: A test of the Schelling segregation model. *Demography*, *28* (1), 1—19.

Cobb, C. W., & Douglas, P. H. (1928). A theory of production. *American Economic Review*, *18* (Suppl. ), S139—S165.

Cohen, M. D., March, J. G. & Olsen, J. (1972). A garbage can model of organizational choice. *Administrative Science Quarterly*, *17* (1), 1—25.

Conte, R., & Castelfranchi, C. (1995). *Cognitive and social action*. London: UCL Press.

D'Aquino, P., Le Page, C., Bousquet, F., Bah, A. (2003). Using self-designed role-playing games and a multi-agent system to empower a local decision-making process for land use management: The selfCormas ex-

periment in Senegal. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *6*(3). Retrieved from http://jasss. soc. surrey. ac. uk/6/3/5. html.

Dean, J. S., Gumerman, G. j., Epstein, J. M., Axtell, R. L., Swedland, A. C., Parker, M. T., & McCarroll, S. (1999). Understanding Anasazi culture change through agent-based modeling. In T. Kohler & G. Gumerman(Eds.), *Dynamics in human and primate societies*. Oxford, UK: Oxford University Press.

Deffuant, G. (2006). Comparing extremism propagation patterns in continuous opinion models. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *9*(3). Retrieved from http://jasss. soc. surrey. ac. uk/9/3/8. html.

Degushi, H. (2004). *Economics as an agent-based complex system*. Tokyo: Springer-Verlag.

Dibble, C., & Feldman, P. G. (2004). The GeoGraph 3D Computational Laboratory: Network and terrain landscapes for RePast. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *7*(1). Retrieved from http://jasss. soc. surrey. ac. uk/7/1/7. html.

Dray, A., Perez, P., Jones, N., Le Page, C., D'Aquino, P., White, I., & Auatabu, T. (2006). The AtollGame experience: From knowledge engineering to computer-assisted role playing game. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *9*(1). Retrieved from http://jasss. soc. surrey. ac. uk/9/1/6. html.

Dunham, J. B. (2005). An agent-based spatially explicit epidemiological model in MASON. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *9*(1). Retrieved from http://jasss. soc. surrey. ac. uk/9/1/3. html.

Eckel, B. (2005). Thinking in Java. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

Edmonds, B. (2006). The emergence of symbiotic groups resulting from skill-differentiation and tags. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *9*(1). Retrieved from http://jasss. soc. surrey. ac. uk/9/1/10. html.

Edmonds, B., & Hales, D. (2003). Replication, replication and replication: Some hard lesions from model alignment. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *6*(4). Retrieved from http://jasss. soc. surrey. ac. uk/6/4/11. html.

Eiben, A. E. , & Smith, J. E. (2003). *Introduction to evolutionary computing*. New York: Springer.

Elias, N. (1969). *The civilizing process*. Oxford, UK: Blackwell. (Original work published 1939).

Engelbrecht, A. P. (2002). *Computational intelligence: An introduction*. Chichester, UK: Wiley.

Epstein, J. M. (1999). Agent-based computational models and generative social science. *Complexity*, *4*(5), 41—60.

Epstein, J. M. (2007). *Generative social science: Studies in agent-based computational modeling*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Epstein, J. M. , & Axtell, R. (1996). *Growing artificial societies: Social science from the bottom up*. Washington, DC: Brookings Institution Press.

Erev, I. , & Roth, A. E. (1998). Predicting how people play games: Reinforcement learning in experimental games with unique, mixed strategy equilibria. *American Economic Review*, *88*(4), 848—881.

Etienne, M. (2003). SYLVOPAST: A multiple target role-playing game to assess negotiation process in sylvopastoral management planning. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *6*(2). Retrieved from http://jasss. soc. surrey. ac. uk/6/2/5. html.

Etienne, M. , Le Page, C. , & Cohen, M. (2003). A step-by-step approach to building land management scenarios based on multiple viewpoints on multi-agent system simulations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(2). Retrieved from http://jasss. soc. surrey. ac. uk/6/2/2. html.

Fagiolo, G. , Windrum, P. , & Moneta, A. (2006). *Empirical validation of agent-based models: A critical survey* (No. 2006/14). Pisa, Italy: Sant'Anna School of Advanced Studies, Laboratory of Economics and Management.

Farmer, J. D. , Patelli, P. , & Zovko, L. I. (2005). The predicative power of zero intelligence in financial markets. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *102*(6), 2254—2259. Retrieved from http://www. santafe. edu/~jdf/papers/zero. pdf.

Fielding, j. , & Gilbert, N. (2000). *Understanding social statistics*. London: Sage.

Fink, E. C. , Gates, S. , & Humes, B. D. (1998). *Game theory topics: In-*

*complete information, repeated games and n-player games* (Sage Series on Quantitative Applications in the Social Sciences, Vol, 122). Thousand Oaks, CA: Sage.

Fioretti, G. (2001). Information structure and behavior of a textile industrial district. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *4* (4). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/4/1.html.

Flache, A., & Macy, M. (2002). Stochastic collusion and the power law of learning. *Journal of Conflict Research*, *46* (5), 629—653.

Forrester, J. W. (1971). *World Dynamics*. Cambridge: MIT Press.

Fortheringhan, A. S., & O'Kelly, M. E. (1989). *Spatial interaction models: Formulations and applications*. Dordrecht: Kluwer.

Friedman-Hill, E. (2003). *Jess in action: Rule-based system in Java*. Greewich, CT: Manning.

Galan, J. M., & Izquierdo, L. (2005). Appearance can be deceiving: Lessons learned re-implementing Axelrod's "evolutionary approach to norms." *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *8* (3). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/3/2.html.

Garson, G. D. (1998). *Neural networks: An introductory guide for social scientists*. London: Sage.

Gaylord, R. J., & D'Andria, L. (1998). *Simulating society: A mathematica toolkit for modeling socioeconomic behavior*. New York: TELOS/Springer Verlag.

Gilbert, N. (1997). A simulation of the structure of academic science. *Sociological Research Online*, *2* (2). Retrieved from http://www.socresonline.org.uk/socresonline/2/2/3.html.

Gilbert, N. (2002). Varieties of emergence. In D. Sallach (Ed.), *Agent 2002: Social agents: Ecology, exchange, and evolution* (pp. 41—56). Chicago: University of Chicago and Argonne National Laboratory.

Gilbert, N. (2006). *A generic model of collectivities*. ABModSim 2006. International Symposium on Agent Based Modeling and Simulation. University of Vienna: European Meeting on Cybernetic Science and System Research.

Gilbert, N., & Abbott, A. (Eds.) (2005). Social Science computation [Special issue]. *American Journal of Sociology*, *110* (4) Chicago: University of Chicago Press.

Gilbert, N., & Bankes, S. (2002). Platforms and methods for agent-based

modeling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *99*(Suppl. 3), 7197—7198.

Gilbert, N., den Besten, M., Bontovics, A., Craenen, B. G. W., Divina, F., Eiben, A. E., et al. (2006). Emerging artificial societies through learning. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *9*(2). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/9/2/9.html.

Gilbert, N., Pyka, A., & Ahrweiler, P. (2001). Innovation networks: A simulation approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *4*(3). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/3/8.html.

Gilbert, N., & Terna, P. (2000). How to build and use agent-based models in social science. *Mind and Society*, *1*(*1*), 57—72.

Gilbert, N., & Troitzsch, K. G. (2005). *Simulation for the social scientists*(2nd ed.). Milton Keynes, UK: Open University Press.

Gimblett, H, R. (2002). *Integrating geographic information systems and agent-based modeling techniques for simulating social and ecological processes*. London: Oxford University Press.

Goolsby, R. (2006). Combating terrorist networks: An evolutionary approach. *Computational and Mathematical Organization Theory*, *12*, 7—20.

Grimm, V., & Railsback, S. F. (2005). *Individual-based modeling and ecology*. Princetion, NJ: Princeton University Press.

Gupta, A., & Kapur, V. (2000). *Microsimulation in government policy and forecasting*. Amsterdam: Elsevier.

Hales, D. (2000). Evolving specialization, altruism, and group-level optimization using tags. In J.S. Sichman, F. Bousquet, & P. Davidsson (Eds.). *Multi-agent-based simulation II* (pp. 26—35). Berlin: Springer-Verlag.

Harding, A. (1996). *Microsimulation and public policy*. New York: Elsevier.

Hegslmann, R., & Krause, U. (2002). Opinion dynamics and bounded confidence models, analysis and simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5(3). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/3/2.html.

Heywood, D. I., Cornelius, S., & Carver, S. (2002). *An introduction to geographical information systems* (2nd ed.). New York: Prentice

Hall.

Hodkinson, P. (2002). *Goth identity, style and subculture.* Oxford, UK: Berg.

Homer, J. B., & Hirsch, G. B. (2006). System dynamics modeling for public health: Background and opportunities. *American Journal of Public Health*, *96*(3), 452—458.

Huberman, B. A., & Glance, N. (1993). Evolutionary games and computer simulations. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, *90*, 7716—7718.

Hutchins, E., & Hazlehurst, B. (1995). How to invent a lexicon: The development of shared symbols in interaction. In N. Gilbert & R. Conte (Eds.), *Artificial Societies.* London: UCL Press.

Izquierdo, S. S., & Izquierdo, L. R. (2006). *The impact on market efficiency of quality uncertainty without asymmetric information.* Paper presented at the Workshop on Agent-Based Models of Consumer Behavior and Market Dynamics, Guildford, UK.

Jacobsen, C., Bronson, R., & Operations Research Society of America. (1985). *Simulation violators.* Arlington, VA: Operations Research Society of America.

Janssen, M., & Jager, W. (1999). An integrated approach to simulating behavioral processes: A case study of the lock-in of consumption patterns. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *2*(2). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/2/2/2.html.

Johnson, P. E. (2002). Agent-based modeling: what I learned from the artificial stock market. *Social Science Computer Review*, *20*, 174—186.

Kahneman, D. (2003). Maps of bounded rationality: Psychology for behavioral economics. *American Economic Review*, *93*(5), 1449—1475.

Kaldor, N. (1961). Capital accumulation and economic growth. In F. A. Lutz & D. C. Hague (Eds.), *The theory of capital* (pp. 177—222). London: Macmillan.

Kitts, J. A. Macy, M. W., & Flache, A. (1999). Structural learning: Attraction and conformity in task-oriented groups. *Computational & Mathematical Organization Theory*, *5*(2), 129—145.

Klemm, K., Eguíluz, V. M., Toral, R., & San Miguel, M. (2003). Global culture: A noise-induced transition in finite systems. *Physcial Review E*, *67*(4). Retrieved from http://arxiv.org/abs/cond-

mat/0205188.

Koesrindartoto, D., Sun, J., & Tesfatsion, L. S. (2005). *An agent-based computational laboratory for testing the economic reliability of wholesale power market designs*. Paper presented at eh Energy, Environment, and Economics in a New Era conference, San Francisco.

Koza, J. R. (1992). *Genetic programming*. Cambridge: MIT Press.

Koza, J. R. (1994). *Genetic programming 2*. Cambridge: MIT Press.

Laird, J. K., Newell, A., & Rosenbloom, P. S. (1987). Soar: An architecture for general intelligence. *Artificial Intelligence*, *33*(1), 1—64.

LeBaron, B., Arthur, W. B., & Palmer, R. (1999). Time series properties of an artificial stock market. *Journal of Economic Dynamic and Control*, *23*, 1487—1516.

Liebrand, B. G., Nowak, A., & Hegselmann, R. (Eds.). (1998). *Computer modeling of social process*. London: Sage.

Link, J., & Fröhlich, P. (2003). *Unit testing in Java: How tests drive the code*. San Francisco: Morgan Kaufmann.

Lorenz, J. (2006). Consensus strikes back in the Hegselmann-Krause Model of continuous opinion dynamics under bounded confidence. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(1). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/9/1/8.html.

Luke, S., Cioffi-Revilla, C., Panait, L., Sullivan, K., & Balan, G. (2005). MASON: A Java multi-agent simulation environment. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, *81*(7), 517—527.

Macy, M., & Willer, R. (2002). From factors to actors: Computational sociology and agent-based modeling. *Annual Review of Sociology*, *28*, 143—166.

Malerba, F., Nelson, R., Orsenigo, L., & Winter, S. G. (2001). History-friendly models: An overview of the case of the computer industry. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *4*(3). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/3/6.html.

Marengo, L. (1992). Coordination and organizational learning in the firm. *Journal of Evolutionary Economics*, *2*(3), 313—326.

McKeown, G., & Sheehy, N. (2006). Mass media and polarization processes in the bounded confidence model of opinion dynamics. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *9*(1). Retrieved from

http://jasss.soc.surrey.ac.uk/9/1/11.html.

Merton, R. K. (1968). *Social theory and social structure* (Enl. ed.) New York: Free Press.

Meyer, M., & Hufschlag, K. (2006). A generic approach to an object-oriented learning classifier system library. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *9*(3). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/9/3/2.html.

Miles, R. (2006). *Learning UML 2.0*. Sebastopol, CA: O'Reilly.

Miiton, L., Sutherland, H., & Weeks, M. J. (2000). *Microsimulation modeling for policy analysis: Challenges and innovations*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Mookherjee, D., & Sopher, B. (1994). Learning behavior in an experimental matching pennies game. *Games and Economic Behavior*, *7*, 62—91.

Mookherjee, D., & Sopher, B. (1997). Learning and decision costs in experimental constant sum games. *Games and Economic Behavior*, 19—132.

Moss, S. (2002). Policy analysis from first principles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *99*(Suppl. 3), 7267—7274.

Mulkay, M. J., & Turner, B. S. (1971). Over-production of personnel and innovation in three social settings. *Sociology*, *5*(1), 47—61.

Niemeyer, P., & Knudsen. J. (2005). *Learning Java* (3rd ed.). Sebastopol, CA: O'Reilly.

Nilsson, N. (1998). *Artificial intelligence: A new synthesis*. San Francisco: Morgan Kaufmann.

North, M. J. (2001). Multi-agent social and organizational modeling of electric power and natural gas markets. *Computational and Mathematical Organization Theory*, *7*. 331—337.

North, M. J., Collier, N. T., & Vos, J. R. (2006). Experience creating three implementations of the repast agent modeling toolkit. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*. *16*(1), 1—25.

Orcutt, G., Merz, J., & Quinke, H. (1986). *Microanalytic simulation models to support social and financial policy*. Amsterdam: North-Holland.

O'Suillvan, D., & Macgill, J. (2005). *Modeling urban residential neighborhood dynamics*. Paper presented at the workshop on Modeling Urban Social Dynamics, University of Surrey, Guildford, UK.

Pajares, J., Hernández-Iglesias, C., & López-Paredes, A. (2004). Modeling learning and R & D in innovative environments: A cognitive multi-agent approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *7*(2). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/2/7.html.

Pancs, R., & Vriend, N. J. (2004). *Schelling's spatial proximity model of segregation revisited*. International Workshop on "Agent-based Models for Economic Policy Design" (ACEPOL05) Retrieved January 20, 2007, from http://ww.wiwi, uni-bielefeld.de/~dawid/acepol/Downloads/Paper/Vriend.pdf.

Papert, S. (1980). *Mindstroms: Children, computers, and powerful ideas*. New York: Basic Books.

Parunak, H. V. D., Savit, R., & Riolo, R. L. (1998, July), Agent-based modeling vs. equation-based modeling: A case study and users' guide. In J. S. Sichman, R. Conte, & N. Gilbert (Eds.), *Proceedings of Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation* (pp. 10-25). Paris: Springer.

Perfors, A. (2002). Simulated evolution of language: A review of the field. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *5* (*2*). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/2/4.html.

Phillips, A. W. (1950). Mechanical models in economic dynamics. *Economica*, *17*(67), 283—305.

Powell, W. W., White, D. R., Koput, K. W., & Owen-Smith, J. (2005). Network dynamics and field evolution: The growth of inter-organizational collaboration in the life sciences. *American Journal of Sociology*, *110*(4), 1132—1205.

Pujol, J. M., Flache, A., Delgado, J. & Sangüesa, R. (2005). How can social network ever become complex? Modeling the emergence of complex networks from local social exchanges. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *8* (4). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/4/2.html.

Railsback, S. F., Lytinen, S. L., & Jackson, S. K. (2006). Agent-based simulation platforms: Review and development recommendations. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, *82* (9), 609—623. Available: http://www.humboldt.edu/~ecomodel/documents/ABMPlatformReview.pdf .

Ramanath, A. M., & Gilbert, N. (2004). Techniques for the construction

and evaluation of parrticipatory simulations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *7*(4). Retrieved from http://jasss. soc. surrey. ac. uk/7/4/1. html.

Raney, B., Cetin, N., Vollmy, A., & Nagel, K. (2002). *Large scale multi-agent transportation simulations.* Paper presented at the Proceedings of the Annual Congress of the European Regional Science Association(ERSA), Dortmund, Germany. Available: http://www. inf. ethz. ch/nagel/papers.

Redmond, G., Sutherland, H., & Wilson, M. (1998). *The arithmetic of tax and social security reform: A user's guide to microsimulation methods and analysis.* Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Reynolds, C. W. (1987). Rocks, herds, and schools: A distributed behavioral model. *Computer Graphics*, *21*(4), 25—34.

Richiardi, M., Leombruni, R., Saam, N., & Sonnessa, M. (2006). A common protocol for agent-based social simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *9*(1). Retrieved from http://jasss. soc. surrey. ac. uk/9/1/15. html.

Riolo, R. L., Cohen, M. D., & Axelrod, R. (2001). Evolution of cooperation without reciprocity. *Nature*, *411*, 441—443.

Roth, A. E., & Erev, I. (1995). Learning in extensive-form games: Experimental data and simple dynamic models in the intermediate term. *Games and Economic Behavior*, *8*, 164—212.

Rouchier, J. (2003). Re-implementation of a multi-agent model aimed at sustaining experimenntal economic research: The case of simulations with emerging speculation. *Journal of Artiificial Societies and Social Simulation*, *6*(4). Retrieved from http://jasss. soc. surrey. ac. uk/6/4/7. html.

Sakoda, J. M. (1971). The checkerboard model of social interaction. *Journal of Mathematical Sociology*, *1*(1), 119-131.

Sallans, B., Pfister, A., Karatzoglou, A., & Dorffner, G. (2003). Simulation and validation of an integrated markets model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *6*(4). Retrieved from http://jasss. soc. surrey. ac. uk/6/4/2. html.

Sawyer, R. K. (2004). Social explanation and computational simulation. *Philosophical Explorations*, *7*(3), 219—231.

Schelling, T. C. (1971). Dynamic models of segregation. *Journal of Mathe-*

*matical Sociology*, *1*, 143—186.

Schelling, T. C. (1978). *Micromotives and macrobehavior*. New York: Norton.

Schweitzer, F. (2003). *Brownian agents and active particles*. New York: Springer-Verlag.

Scott, J. (2000). *Social network analysis* (2nd ed.). London: Sage.

Simmel, G. (1907). Fashion. *International Quarterly*, 10, 130—155.

Simon, H. A. (1957). A behavioral model of rational choice. In H. A. Simon(Ed.), *Models of man*. New York: Wiley.

Slanina, F. (2000). *Social organization in the minority game model*. Retrieved from http://arxiv.org/abslcond-mat/0006098.

Squazzoni, F., & Boero. R. (2002). At the edge of variety and coordination: An agent-based computational model of industrial districts. *Journal of Artificial Societies and Social Simuulation*, *5* (1). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/1/1.html.

Stauffer, D., Sousa, A., & Schulze, C. (2004). Discretized opinion dynamics of the Deffaunt model on scale-free networks. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 7(3). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7 /3/7.html.

Steels, L. (2004). The evolution of communication systems by adaptive agents. In E. Alonso, D. Kudenko, & D. Kazakov(Eds.), *Adaptive agents and multi-agent systems* (Vol. 2636, pp. 125—140). Berlin: Springer Verlag.

Sterman, J. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Boston: Irwin McGraw-Hill.

Strader, T. J., Lin, F., & Shaw, M. J. (1998). Simulation of order fulfillment in divergent assembly supply chains. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *1* (2). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.ac.uk/1/2/5.html.

Sun, R. (2006). The CLARION cognitive architecture: Extending cognitive modeling to social simulation. In R. Sun(Ed.) *Cognition and multi-agent interaction: From cognitive modeling to social simulation*. New York: Cambridge University Press.

Sun, R., & Naveh, I. (2004). Simulating organizational decision-making using a cognitively realistic agent model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *7*(3). Retrieved from http://jasss.soc.surrey.

ac. uk/7 /3/5. html.

Sutton, R. S. , & Barto, A. G. (1998). *Reinforcement learning: An introduction*. Cambridge: MIT Press.

Taatgen, N. , Lebiere, C. , & Anderson, J. (2006). Modeling paradigms in ACT-R. In R. Sun(Ed. ), *Cognition and multi-agent interaction: From cognitive modeling to social simulaation*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Tesfatsion, L. , & Judd, K. (2006). *Handbook of computatiollal economics* (Vol. 2). Amsterdam: North-Holland.

Thorngate, W. (2000). Teaching social simulation with Matlab. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *3* (1). Retrieved from http://www. soc. surrey. ac. uk/JASSS/3/1/ forum/1. html.

Thornton, S. (1995). *Club cultures: Music, media and subcultural capital.* Cambridge, MA: Polity.

Tobias, R. , & Hofmann, C. (2004). Evaluation of free Java-libraries for social-scientific agent based simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *7*(1). Retrieved from http://jasss. soc. surrey. ac. uk/7/1/6. html.

Troitzsch, K. G. (2004). *Validating simulation models.* 18th European Simulation Multiconferrence, SCS Europe.

Vogt, P. (2005). The emergence of compositional structures in perceptually grounded language games. *Artificial Intelligence*, *167* (1—2), 206—242.

Vogt, P. , & Coumans, H. (2003). Investigating social interaction strategies for bootstrapping lexicon development. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *6* (1). Retrieved from http://jasss. soc. surrey. ac. uk/6/1/4. html.

Waterman, D. A. , & Hayes-Roth, F. (1978). *Pattern-directed inference systems*. Orlando, FL: Academic Press.

Watts, D. (1999). Network dynamics and the small world phenomenon. *American Journal of Sociology*, *105*(2), 493—527.

Watts, D. , & Strogatz, S. (1998). Collective dynamics of "small-world" networks. *Nature*, *393*, 440—442.

Widdicombe, S. , & Wooffitt, R. C. (1990). "Being" versus "doing" punk (etc): On achieving authenticity as a member. *Journal of Language and Social Psychology*, *9*, 257—277.

Wilensky, U. (1998). NetLogo segregation model. Evanston, IL: Northwestern University, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Retrieved from http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Segregation.

Wilensky, U. (1999). *NetLogo*. Evanston, IL: Northwestern University, Center for Connected Learning and Computet-Based Modeling. Retrieved from http://ccl.northwestern.edu/netlogo.

Wilenskv, U. (2005). *NetLogo wolf sheep predation (system dynamics) model*. Evanston, IL: Nonhwestern University, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Retrieved from http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/WolfSheepPredaticn (System Dynamics)

Wooldridge, M., & Iennings, N. R. (1995). Intelligent agents: Theory and practice. *Knowledge Engineering Review*, *10*(2), 115—152.

Wray, R. E., & lones, R. M. (2006). Considering Soar as an agent architecture. In R. Sun(Ed.), *Cognition and multi-agent interaction: From cognitive modeling to social simulation*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Ye, M., & Carley, K. M. (1995). Radar-Soar: Towards an artificial organization composed of intelligent agents. *Journal of Mathematical Sociology*, *20*(2—3), 219—246.

Zhang, I. (2004). A dynamic model of residential segregation. *Journal of Mathematical Sociology*, *28*(3), 147—170.

| 译名对照表 | |
|---|---|
| abstract model | 抽象模型 |
| agent-based models | 基于行动者模型 |
| agents | 行动者 |
| analogical model | 类比模型 |
| Artificial Neural Networks(ANNs) | 模拟神经网络 |
| automomy | 自主性 |
| back-propagation algorithm | 反向传播算法 |
| Boid models | Boid 模型 |
| boundedly rational | 有限理性 |
| calibrating time | 校准时间 |
| companion modeling | 伴随建模 |
| connection weight | 连接权重 |
| corner testing | 拐角测试 |
| debugging | 除错 |
| environment | 环境 |
| equation-based model | 基于公式模型 |
| event-Driven Simulation | 事件驱动模拟 |
| evolutionary computation | 进化计算 |
| experiment | 试验 |
| Facsimile Models | 传真模型 |
| framework | 框架 |
| game theory | 博弈理论 |
| genetic algorithm | 遗传算法 |
| genetic programming | 遗传编程 |
| Geographical Information System(GIS) | 地理信息系统 |
| global variables | 全局变量 |
| ideal-type model | 理想型模型 |
| innovation models | 创新模型 |
| learning algorithm | 学习算法 |
| learning classifier systems | 学习分类器系统 |
| library | 程序库 |

| | |
|---|---|
| local-radius | 局部—半径 |
| machine learning | 机器学习 |
| matrix of conditional probabiliteis | 条件概率矩阵 |
| microsimulation model | 微观模拟模型 |
| middle range model | 中层模型 |
| model of innovation networks | 创新网络模型 |
| modeling environments | 建模环境 |
| modularity | 模块性 |
| multiagent system | 多行动者系统 |
| NetLogo segregation model | NetLogo 隔离模型 |
| opinion dynamic model | 民意动态模型 |
| paricipative modeling | 参与建模 |
| power law | 幂次法则 |
| preferential attachment | 偏好连接 |
| proactivity | 主动性 |
| production rule system | 生产准则系统 |
| pseudo-code | 伪编码 |
| random asynchronous execution | 随机不同步执行 |
| random network | 随机网络 |
| reactivity | 反应性 |
| reinforcement learning | 强化学习 |
| role-playing game | 角色扮演游戏 |
| rule of thumb | 经验法则 |
| scale model | 比例模型 |
| sensitivity analysis | 灵敏度分析 |
| sequential asynchronous execution | 有序不同步执行 |
| simulated synchronous execution | 模拟的同步执行 |
| "small world" network | "小世界"网络 |
| social network analysis | 社会网络分析 |
| spatially explicit | 空间直观 |
| statistical signatures | 统计信号 |
| stylized facts | 程式化事实 |

| | |
|---|---|
| synchronicity | 共时性 |
| system dynamics | 系统动力学 |
| target of model | 模型原型 |
| the minority game | 少数人游戏 |
| toolkits | 工具箱 |
| Unified Modeling Languages(UML) | 统一建模语言 |
| validation | 有效性验证 |
| verification | 检验 |
| visible-radius | 可见一半径 |
| working memory | 工作记忆 |